



João Manuel Fernandes Cardoso

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Desenvolvimento de uma Ferramenta para a Verificação Automática de Colunas-Viga de Acordo com o Eurocódigo 3

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Doutor Rodrigo de Moura Gonçalves,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor Corneliu Cismasiu
Arguente:	Prof. Doutor João Rocha de Almeida
Vogal:	Prof. Doutor Rodrigo de Moura Gonçalves



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Novembro de 2011

"Copyright" Todos os direitos reservados. João Manuel Fernandes Cardoso.

Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Rodrigo Gonçalves pela orientação, acompanhamento permanente, interesse que sempre demonstrou na concretização desta dissertação, e pelos conhecimentos, conselhos transmitidos e toda a disponibilidade demonstrada.

À minha família, aos meus pais e irmã pelo apoio incondicional dado durante estes meses, pois sem eles muito dificilmente seria realizada esta dissertação.

À Filipa pelos conselhos dados e por ouvir os meus desabafos.

Aos meus colegas de curso e amigos pelo incentivo e apoio transmitido durante o meu percurso académico.

RESUMO

Nesta dissertação abordam-se as equações de verificação da segurança de colunas-viga de aço através do Método 2 do Eurocódigo 3 (EC3), assim como os parâmetros, metodologias e tipos de análise que lhe estão associadas.

É desenvolvida e apresentada uma ferramenta de cálculo para a avaliação da segurança de colunas-viga tendo em conta as equações do EC3, com o propósito de constituir uma ferramenta útil ao projecto e análise de estruturas metálicas. Para efeitos de ilustração da sua aplicação e validação, são apresentados e discutidos vários exemplos.

Palavras-chave:

Colunas-viga de aço

Método 2

Eurocódigo 3

Ferramenta de cálculo automático

ABSTRACT

This work addresses the equations related to the safety checking of steel beam-columns using Method 2 of Eurocode 3 (EC3), as well as the associated parameters, methodologies and types of analysis.

A calculation tool for the evaluation of the safety of beam-columns according to EC3 is developed and presented. The main purpose is to provide a useful and user-friendly tool for steel designers. For validation and illustration purposes, several examples are presented and discussed.

Keywords:

Steel beam-columns

Method 2

Eurocode 3

Calculation tool

ÍNDICE DE MATÉRIAS

Resumo	I
Abstract	III
Índice de Matérias	V
Índice de Figuras	IX
Índice de Tabelas	XIII
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos	XV
 1 Introdução	 1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Organização da dissertação	2
 2 Fundamentos e Metodologias do EC3.....	 3
2.1 Classes das secções	3
2.2 Consideração dos efeitos de 2ª ordem.....	5
2.2.1 Contabilização directa dos efeitos “P-Δ”	7
2.2.2 Contabilização indirecta dos efeitos “P-Δ”	7
2.3 Consideração das imperfeições	7
2.4 Verificação da segurança das estruturas	9
2.4.1 Colunas	9
2.4.1.1 Tracção	9
2.4.1.2 Compressão	9
2.4.2 Vigas.....	12
2.4.2.1 Esforço transversal	12
2.4.2.2 Momento flector	13
2.4.3 Colunas-viga.....	15
2.4.3.1 Verificação das secções de extremidade	17
 3 Ferramenta de Cálculo.....	 21
3.1 “Menu Entrada”	21

3.2	“Definir Peça/Estrutura”	23
3.2.1	Modo de funcionamento da “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura”	24
3.2.1.1	Parâmetro – “Nome Peça”	25
3.2.1.2	Parâmetro – “Perfil”	25
3.2.1.3	Parâmetro – “ f_y ”	26
3.2.1.4	Parâmetros – “ γ_{M0} ” e “ γ_{M1} ”	26
3.2.1.5	Parâmetro – “Resistência Secção”	27
3.2.1.6	Parâmetro – “Suscep. Torção”	27
3.2.1.7	Momento Crítico	27
3.2.1.7.1	Parâmetro – “ k_z ”	28
3.2.1.7.2	Parâmetro – “ k_w ”	28
3.2.1.7.3	Parâmetros – “ C_1 ” e “ C_2 ”	29
3.2.1.7.4	Parâmetro – “ L ”	29
3.2.1.7.5	Parâmetro – “ M_{cr} ”	30
3.2.1.8	Parâmetros – “ $L_{cr,y}$ ” e “ $L_{cr,z}$ ”	31
3.2.1.9	Parâmetros – “ N_{Ed} ”, “ M_{yEd} ” e “ M_{zEd} ”	31
3.2.1.10	Parâmetros – “ $M_{yEd,ext.}$ ” e “ $M_{zEd,ext.}$ ”	32
3.2.1.11	Parâmetros – “ C_{my} ”, “ C_{mz} ” e “ C_{mLT} ”	33
3.2.1.12	Parâmetro – “Seleccionar”	34
3.2.1.13	Parâmetro – “Apagar”	34
3.3	“Definir Peça/Estrutura (Modo Excel)”	34
3.3.1	Modo de funcionamento e particularidades.....	34
3.4	Relatórios	37
3.4.1	“Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura”	37
3.4.1.1	Factores a ter em conta.....	40
3.4.2	“Verificação Final”	42
3.4.2.1	Factores a ter em conta.....	45
4	Exemplos de Validação	47
4.1	Problema 1	47
4.1.1	Classificação da secção transversal	48
4.1.2	Verificações da segurança do elemento analiticamente	49

4.1.3 Verificações da segurança do elemento recorrendo à ferramenta de cálculo	50
4.2 Problema 2	52
4.2.1 Classificação da secção transversal	53
4.2.2 Verificações da segurança do elemento analiticamente	54
4.2.3 Verificações da segurança do elemento recorrendo à ferramenta de cálculo	56
4.3 Problema 3	58
4.3.1 Classificação da secção transversal	59
4.3.2 Verificações da segurança do elemento analiticamente	59
4.3.3 Verificações da segurança do elemento recorrendo à ferramenta de cálculo	61
4.4 Problema 4	63
4.4.1 Classificação da secção transversal	64
4.4.2 Verificações da segurança do elemento analiticamente	65
4.4.3 Verificações da segurança do elemento recorrendo à ferramenta de cálculo	68
4.5 Problema 5	69
4.5.1 Cargas consideradas	69
4.5.2 Combinações de carregamento.....	70
4.5.3 Imperfeições do pórtico.....	70
4.5.4 Determinação das cargas últimas	71
4.5.5 Classificação da secção transversal	73
4.5.6 Comprimentos de encurvadura.....	73
4.5.7 Verificações da segurança do elemento analiticamente	74
4.5.8 Verificações da segurança do elemento recorrendo à ferramenta de cálculo	77
5 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	79
Bibliografia	81
Anexo A	83
Tabelas	83
Consultas	84
Resistência da Secção	85
N e M.....	86
MN	86
Verificação Final	86

Formulários	86
Relatórios	87
Macros.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Comportamento de secções à flexão [Simões, 2005].....	3
Figura 2.2 - Efeitos da configuração deformada da estrutura [Extraído do EC3]	6
Figura 2.3 - Imperfeição global da estrutura (ϕ) e forças horizontais equivalentes [Extraído do EC3].	8
Figura 2.4 - Imperfeição local da barra (e_0) e forças horizontais equivalentes [Extraído do EC3]	9
Figura 2.5 - Curvas europeias de dimensionamento de colunas [Extraído do EC3]	12
Figura 3.1 – “Menu Entrada”	22
Figura 3.2 – “Caixa de Mensagem” (Ajuda!) do “Menu Entrada”	23
Figura 3.3 - “Definir Peça/Estrutura”	23
Figura 3.4 – “Caixa de mensagem” (Ajuda!) de “Definir Peça/Estrutura”	24
Figura 3.5 - Tabela da folha de dados “Definir Peça/Estrutura”	24
Figura 3.6 – “Caixa de mensagem” exibida quando o utilizador não define o parâmetro “Nome Peça”	25
Figura 3.7 - Geometria, dimensões e eixos coordenados das secções em I, H, SHS e RHS [Extraído do EC3]	25
Figura 3.8 – “Caixa de mensagem” para valores não seleccionáveis para o parâmetro “fy”	26
Figura 3.9 – “Caixa de mensagem” para valores não admitidos para o parâmetro “ γ_{M0} ” e “ γ_{M1} ”, respectivamente	26
Figura 3.10 - Caixa de mensagem para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para os parâmetros “ γ_{M0} ” e “ γ_{M1} ”	26
Figura 3.11 – “Caixa de mensagem” para valores não admitidos para o parâmetro “Resistência Secção”	27
Figura 3.12 – “Caixa de mensagem” para valores não admitidos para o parâmetro “Suscep. Torção”	27
Figura 3.13 - Parâmetros directamente relacionados com o parâmetro “Suscep. Torção”	28
Figura 3.14 – “Caixa de mensagem” para valores não admitidos para o parâmetro “ k_z ”	28
Figura 3.15 – “Caixa de mensagem” para valores não admitidos para o parâmetro “ k_w ”	29
Figura 3.16 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para o parâmetro “ C_1 ”, e “ C_2 ” respectivamente	29

Figura 3.17 – “Caixa de mensagem” para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para os parâmetros “ C1 ” e “ C2 ”	29
Figura 3.18 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para o parâmetro “ L ”	30
Figura 3.19 – “Caixa de mensagem” para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para o parâmetro “ L ”	30
Figura 3.20 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para o parâmetro “ Mcr ”	30
Figura 3.21 - “Caixa de mensagem” para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para o parâmetro “ Mcr ”	31
Figura 3.22 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para os parâmetros “ Lcr,y ”, e “ Lcr,z ” respectivamente	31
Figura 3.23 – “Caixa de mensagem” para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para os parâmetros “ Lcr,y ” e “ Lcr,z ”	31
Figura 3.24 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para os parâmetros “ NEd ”, “ MyEd ” e “ MzEd ” respectivamente.....	32
Figura 3.25 – “Caixa de mensagem” para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para os parâmetros “ Ned ”, “ MyEd ” e “ MzEd ”	32
Figura 3.26 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para os parâmetros “ MyEd,extremidade ” e “ MzEd,extremidade ”, respectivamente	32
Figura 3.27 – “Caixa de mensagem” para valores menores que “zero” para os parâmetros “ MyEd,extremidade ” e “ MzEd,extremidade ”, respectivamente	33
Figura 3.28 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para os parâmetros “ Cmy ”, “ Cmz ” e “ CmLT ”, respectivamente	33
Figura 3.29 – “Caixa de mensagem” para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para os parâmetros “ Cmy ”, “ Cmz ” e “ CmLT ”	33
Figura 3.30 – “Caixa de mensagem” para confirmação da exclusão de um elemento da “folha de dados”	34
Figura 3.31 – Tabela da “folha de dados” - “Definir Peça/Estrutura (Modo Excel)”	35
Figura 3.32 – Tabela “Microsoft Office Excel”	36
Figura 3.33 - Tabela da “folha de dados” - “Definir Peça/Estrutura (Modo Excel)”	36
Figura 3.34 - Exemplo de Relatório “Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura” – parte 1	38

Figura 3.35 – Exemplo de relatório “Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura” – parte 2	38
Figura 3.36 – Exemplo de relatório “Resistência da Secção, Momento Crítica e Encurvadura” (Factores a ter em conta) – parte 1	41
Figura 3.37 – Exemplo de relatório “Resistência da Secção, Momento Crítica e Encurvadura” (Factores a ter em conta) – parte 2	41
Figura 3.38 – Exemplo 1 de relatório “Verificação Final”	42
Figura 3.39 – Exemplo 2 de relatório “Verificação Final”	44
Figura 3.40 - Exemplo 3 de relatório “Verificação Final”	44
Figura 3.41 – “Caixa de mensagem” para dados incompatíveis para o relatório “Verificação Final” ..	45
Figura 4.1 - Coluna-viga com peril RHS 200x100x10.....	47
Figura 4.2 - Dados do problema 1 na folha de dados – “Definir Peça/Estrutura”	51
Figura 4.3 – Esforços internos máximos resistentes	51
Figura 4.4 – Parâmetros da encurvadura por flexão.....	51
Figura 4.5 – Parâmetros da encurvadura lateral por flexão-torção.....	51
Figura 4.6 – Coeficientes de interacção e verificações	51
Figura 4.7 - Colua-viga com perfil RHS 200x100x10	52
Figura 4.8 - Dados do problema 2 na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura”	57
Figura 4.9 – Esforços internos máximos resistentes	57
Figura 4.10 – Parâmetros da encurvadura por flexão.....	57
Figura 4.11 – Parâmetros da encurvadura lateral por flexão-torção.....	57
Figura 4.12 – Coeficientes de interacção e verificações	57
Figura 4.13 - Coluna-viga com perfil IPE 200	58
Figura 4.14 – Dados do problema 3 na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura”	62
Figura 4.15 – Esforços internos máximos resistentes	62
Figura 4.16 – Parâmetros da encurvadura por flexão.....	62
Figura 4.17 – Parâmetros da encurvadura lateral por flexão-torção.....	62
Figura 4.18 – Coeficientes de interacção e verificações	62
Figura 4.19 - Coluna-viga com perfil IPE 500	63

Figura 4.20 – Dados do problema 4 na folha de dados – “Definir Peça/Estrutura”	68
Figura 4.21 – Esforços internos máximos resistentes	68
Figura 4.22 – Parâmetros da encurvadura por flexão.....	68
Figura 4.23 – Parâmetros da encurvadura lateral por flexão-torção.....	68
Figura 4.24 - Coeficientes de interacção e verificações	68
Figura 4.25 – Pórtico com pilares de perfil HEB 260, vigas intermédias de perfil IPE 450 e viga de topo IPE 360.....	69
Figura 4.26 – Diferentes carregamentos considerados para o pórtico.....	70
Figura 4.27 - Esforços internos (N e M_y) interior do pórtico, incluindo imperfeições geométricas e efeitos de 2ª ordem	72
Figura 4.28 - Dados do problema 5 na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura”	77
Figura 4.29 - Esforços internos máximos resistentes	77
Figura 4.30 - Parâmetros da encurvadura por flexão	77
Figura 4.31 - Parâmetros da encurvadura lateral por flexão-torção	78
Figura 4.32 - Coeficientes de interacção e verificações	78
Figura A.1 - Ferramenta de cálculo – M.S. Access 2007	83
Figura A.2 - Tabelas da ferramenta de cálculo.....	84
Figura A.3 - Consultas da ferramenta de cálculo	85
Figura A.4 - Relação estabelecida entre a tabela “Criar Peça” e “Perfil”	85
Figura A.5 - Formulários da ferramenta de cálculo	87
Figura A.6 - Relatórios da ferramenta de cálculo.....	87
Figura A.7 - Macros da ferramenta de cálculo	88

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores limite das esbeltezas para a classificação de banzos [Extraído do EC3]	4
Tabela 2.2 - Valores limite das esbeltezas para a classificação de almas [extraído do EC3].....	5
Tabela 2.3 - Valores do factor de imperfeição α para as diferentes curvas adoptadas para o dimensionamento de colunas [Extraído do EC3]	10
Tabela 2.4 - Escolha da curva de encurvadura em função da secção transversal [Extraído do EC3] ...	11
Tabela 2.5 - Curvas recomendadas para o dimensionamento de vigas [Extraído do EC3].....	14
Tabela 2.6 - Valores do factor de imperfeição α_{LT} para as diferentes curvas adoptadas para o dimensionamento de vigas [Extraído do EC3]	14
Tabela 2.7 - Factores de interacção k_{ij} do Método 2 para colunas-viga não susceptíveis a torção [Extraído do EC3]	16
Tabela 2.8 - Factores de interacção k_{ij} do Método 2 para colunas-viga susceptíveis a torção [Extraído do EC3]	16
Tabela 2.9 - Factores de momento uniforme equivalente C_m [Extraído do EC3].....	17
Tabela 3.1 - Selecção de elementos na ferramenta de cálculo para análise	34
Tabela 3.2 - Identificação dos parâmetros assumidos no relatório “Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura”	39
Tabela 3.3 - Identificação dos parâmetros assumidos no relatório “Verificação Final”	43
Tabela 4.1 - Características do perfil adoptado RHS 200x100x10	48
Tabela 4.2 - Propriedades do material (aço).....	48
Tabela 4.3 - Esforços internos da coluna-viga	48
Tabela 4.4 - Características do perfil adoptado RHS 200x100x10	52
Tabela 4.5 - Propriedades do material (aço).....	53
Tabela 4.6 - Esforços internos da coluna-viga	53
Tabela 4.7 - Características do perfil adoptado IPE 200	58
Tabela 4.8 - Propriedades do material (aço).....	59
Tabela 4.9 - Esforços internos da coluna-viga	59
Tabela 4.10 - Características do perfil adoptado IPE 500	64
Tabela 4.11 - Propriedades do material (aço).....	64

Tabela 4.12 - Esforços internos da coluna-viga	64
Tabela 4.13 - Forças verticais actuantes no pórtico	69
Tabela 4.14 - Forças horizontais actuantes no pórtico	70
Tabela 4.15 - Cargas horizontais equivalentes	71
Tabela 4.16 - Cargas e classificação do pórtico	71
Tabela 4.17 - Factor de ampliação	71
Tabela 4.18 - Alterações dos factores parciais de segurança incluindo os efeitos de amplificação	71
Tabela 4.19 - Características do perfil adoptado IPE 500	72
Tabela 4.20 - Propriedades do material (aço)	73
Tabela 4.21 - Esforços internos da coluna-viga	73

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas

EC3 Eurocódigo 3

Siglas

CTPN Comissão Técnica Portuguesa de Normalização

CEN Comité Européu de Normalização

Índices

$()^I$ relativo à primeira ordem

$()^{II}$ relativo à segunda ordem

$()_{cr}$ valor crítico

$()_{Ed}$ valor de cálculo de esforço actuante

$()_{el}$ esforço elástico

$()_{LT}$ relativo à instabilidade lateral por flexão-torção

$()_{pl}$ esforço plástico

$()_{Rd}$ valor de cálculo de esforço resistente

$()_{Rk}$ valor característico de esforço resistente

$()_y$ relativo ao eixo y

$()_z$ relativo ao eixo z

Símbolos

Letras latinas

A área da secção transversal

A_v área de corte da secção transversal

b largura do banzo do perfil de aço

C_1, C_2 constantes envolvidas no cálculo do momento crítico

C_m factor de momento equivalente

d altura da parte recta da alma

E módulo de elasticidade

f_y tensão de cedência

G módulo de distorção

h altura da secção

h_w altura da alma secção

i raio de giração

I momento de inércia

I_t factor de rigidez à torção

I_ω constante de empenamento

k_{ij} coeficiente de interacção

k_w coeficiente que traduz o grau de impedimento ao empenamento

k_z coeficiente que traduz as condições de apoio da viga

L comprimento do elemento

L_e comprimento de encurvadura

M momento flector

$M_{b,Rd}$ valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral por flexão-torção

$M_{N,Rd}$ valor de cálculo do momento plástico reduzido pela presença do esforço axial

n relação entre o esforço axial actuante e o esforço axial plástico

N esforço axial

$N_{b,Rd}$ valor de cálculo do esforço axial resistente à encurvadura por flexão simples

t_f espessura do banzo do perfil de aço

t_w espessura da alma do perfil de aço

V esforço transversal

x, y, z coordenadas cartesianas

W módulo de flexão

Letras Gregas

χ factor de redução para a instabilidade por flexão

γ_{M0} coeficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe

γ_{M1} coeficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura

$\bar{\lambda}$ esbelteza normalizada ou adimensionalizada

ψ relação entre os momentos de extremidade de uma coluna-viga

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A alta resistência aliada ao baixo peso estrutural tornou o aço como um dos materiais mais requisitados na construção. A sua utilização como material estrutural, possibilitou a Arquitectos e Engenheiros adoptar soluções cada vez mais arrojadas, com estruturas mais esbeltas, estritamente eficientes e de alta qualidade estética. Em geral, as estruturas metálicas permitem uma maior rapidez de montagem, o que se traduz numa redução do tempo de construção.

As estruturas reticuladas, de grande aplicação na Construção Civil (desde simples placares publicitários e apeadeiros para transportes públicos, a estruturas mais complexas como edifícios e pontes), são constituídas por peças prismáticas lineares, i.e., por barras rectilíneas e de secção transversal uniforme. Quanto à sua secção transversal, as mais frequentes são normalizadas (perfis laminados a quente) em I e H (com dupla simetria) e tubulares (circulares, quadrangulares e rectangulares).

A capacidade de alteração/remodelação das estruturas reticuladas durante o seu período de serviço, e a possibilidade da reciclagem dos seus elementos são factores que também conferem uma grande vantagem ao uso do aço. Ao invés, as suas desvantagens devem-se à necessidade de aplicar um sistema de protecção anti-corrosão e a fraca resistência ao fogo. A nível económico, tem ainda como desvantagem o seu custo elevado.

Com a acumulação dos conhecimentos do comportamento do material, foram elaborados os primeiros regulamentos para o dimensionamento e verificação de estruturas de aço, vindo a ser aperfeiçoados, com a evolução dos recursos computacionais, com a incorporação de efeitos não-lineares do material (plasticidade).

No sentido de desenvolver e uniformizar regras de cálculo e dimensionamento para estruturas metálicas surge o Eurocódigo 3, constituindo uma actualização e reformulação de algumas lacunas da regulamentação existente.

Na análise global de estruturas metálicas, a determinação de esforços e deslocamentos depende fundamentalmente das suas características de deformabilidade e rigidez, tal como da estabilidade global e dos seus elementos, da inclusão das imperfeições e da deformabilidade dos apoios (Simões, 2005). Os elementos (barras) que compõem estas estruturas, estão na sua grande maioria sujeitos a combinações de esforços axiais de compressão e momentos flectores (numa ou em ambas as direcções principais de flexão), sendo designados por colunas-viga. Para as verificações individuais destes elementos, foram desenvolvidas fórmulas de interacção, calibradas e validadas através de comparações com resultados numéricos e experimentais (Boissonnade *et al.*, 2006). As fórmulas de interacção passaram a incluir parâmetros calibrados, como forma de incluir todos os fenómenos envolvidos (fenómenos de instabilidade, imperfeições, combinações de esforços).

Foi com o objectivo de facilitar a verificação da segurança de colunas-viga (tendo em consideração as metodologias e fundamentos do EC3), que surge a necessidade deste trabalho, através da elaboração e apresentação de uma ferramenta de cálculo automático.

1.2 Objectivos

A familiarização com as filosofias e os fundamentos subjacentes às equações de verificação da segurança e dimensionamento de elementos metálicos propostas no EC3, correspondente à norma europeia EN 1993-1-1, é de extrema importância para o projecto de estruturas metálicas. Assim, este trabalho começa por rever as metodologias e fundamentos abordados no EC3 para a verificação da segurança de barras e pórticos de aço.

Tendo em conta as necessidades de cálculo apresentadas no projecto de estruturas metálicas, este trabalho tem como objectivo desenvolver uma ferramenta de cálculo automático, de fácil utilização, para a verificação da segurança de colunas-viga, tendo em consideração as equações abordadas no EC3. Para o efeito, será efectuada a validação da ferramenta de cálculo através da comparação dos seus resultados com problemas propostos.

1.3 Organização da dissertação

Este trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos, em que o primeiro capítulo, de carácter introdutório, aborda os conceitos em estudo.

No segundo capítulo, abordam-se as equações e conceitos do EC3 tidos em conta na elaboração da ferramenta de cálculo para a verificação da segurança de colunas-viga.

O terceiro capítulo apresenta a ferramenta de cálculo executada para este trabalho, com o objectivo de familiarizar o utilizador relativamente ao seu modo de funcionamento.

No quarto capítulo procede-se à validação da ferramenta de cálculo proposta neste trabalho, através da comparação dos seus resultados com resoluções de problemas propostos de barras isoladas e inseridas em pórticos.

Por último, no capítulo cinco, apresentam-se as conclusões do trabalho e sugerem-se futuros desenvolvimentos para a ferramenta de cálculo.

2 FUNDAMENTOS E METODOLOGIAS DO EC3

Este capítulo aborda as disposições do EC3 relativas ao dimensionamento e verificação da segurança de elementos individuais (barras) e globais (pórticos), tal como todos os fundamentos e metodologias que estão envolvidos.

2.1 Classes das secções

A classificação das secções transversais das barras permite avaliar em que medida a sua resistência e capacidade de rotação são limitadas por fenómenos de encurvadura local (instabilidade das chapas que constituem as secções transversais).

O EC3 classifica as secções transversais de uma barra em quatro classes distintas, sendo elas:

- Classe 1: secções onde se pode atingir a resistência plástica, existindo a capacidade de rotação suficiente para se formarem rótulas plásticas;
- Classe 2: secções onde se pode atingir a resistência plástica, mas apresentam limitações na capacidade de rotação;
- Classe 3: secções onde a fibra mais comprimida, assumindo uma distribuição elástica de tensões, pode atingir a tensão de cedência, mas a ocorrência de fenómenos de encurvadura local não permitem atingir a resistência plástica;
- Classe 4: secções afectadas pela ocorrência de fenómenos de encurvadura local, impedindo que a tensão de cedência seja atingida na fibra mais comprimida.

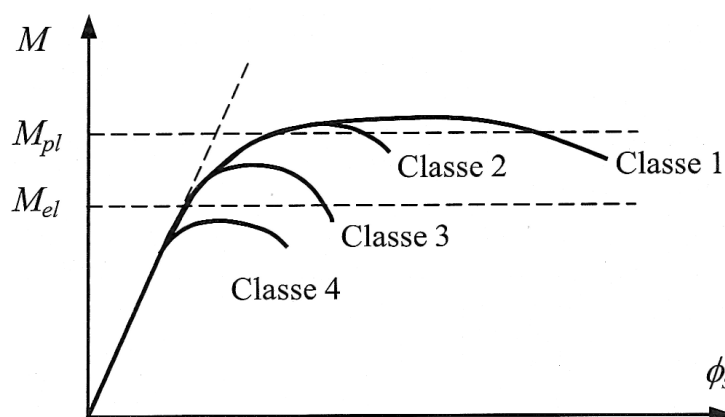


Figura 2.1 – Comportamento de secções à flexão [Simões, 2005]

Esta classificação está dependente (i) das dimensões da secção, i.e., depende da esbelteza dos elementos $\frac{b}{t}$ (relação entre a largura e espessura das chapas), (ii) da distribuição das tensões normais actantes na secção transversal, (iii) do tipo de perfil (laminado ou soldado), (iv) da tensão de cedência

do aço (através do parâmetro $\varepsilon = (\frac{235}{f_y})^{0.5}$ e (v) das condições de apoio dos seus elementos (alma e banzo).

A Figura 2.1 ilustra o comportamento à flexão das quatro classes de secções anteriormente anunciadas, em que M_{el} e M_{pl} representam o momento elástico e plástico da secção, e ϕ_s a rotação da secção transversal de uma barra. Os pontos de bifurcação devem-se à ocorrência de fenómenos de encurvadura local, limitando assim a resistência do elemento.

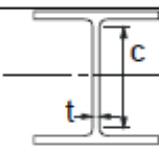
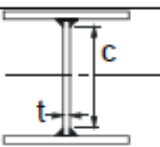
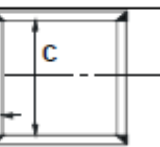
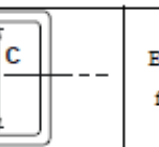
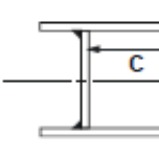
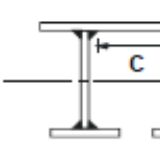
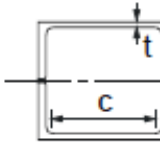
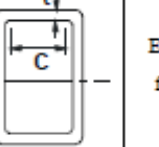
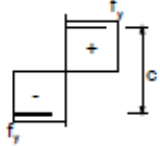
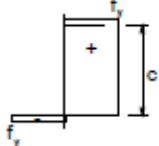
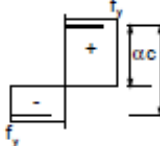
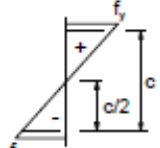
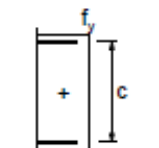
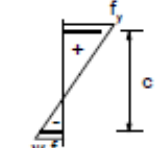
A classificação das secções pelo EC3 é efectuada de acordo com a Tabela 2.1 (banzos) e a Tabela 2.2 (almas), onde a classe de uma secção será sempre a maior das classes dos seus elementos comprimidos.

Este trabalho foca-se em secções de classes 1, 2 e 3, excluindo as secções de classe 4.

Tabela 2.1 - Valores limite das esbeltezas para a classificação de banzos [Extraído do EC3]

Banzos em consola							
Secções laminadas				Secções soldadas			
Classe	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão					
		Extremidade comprimida		Extremidade traccionada			
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)							
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)							
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$					
Para k_σ ver a EN 1993-1-5							
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460	
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71	

Tabela 2.2 - Valores limite das esbeltezas para a classificação de almas [extraído do EC3]

Componentes internos comprimidos						
   						Eixo de flexão
   						Eixo de flexão
Classe	Componente solicitado à flexão	Componente solicitado à compressão		Componente solicitado à flexão e à compressão		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$		quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$		
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$		quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$		quando $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ quando $\psi \leq -1^*$: $c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$		
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

* $\psi \leq -1$ aplica-se quando a tensão de compressão $\sigma \leq f_y$ ou quando a extensão de tracção $e_y > f_y/E$.

2.2 Consideração dos efeitos de 2ª ordem

Os efeitos geometricamente não-lineares ou de 2ª ordem podem ser incluídos de forma directa ou indirecta na análise.

A contabilização dos efeitos “P-δ” das barras no EC3 (efeitos de 2ª ordem locais) pode ser feita de forma directa, através da sua inclusão na análise global, como de forma indirecta, através das fórmulas de interacção das barras, como será abordado mais à frente.

Quanto aos efeitos “P-Δ” dos pórticos (efeitos de 2ª ordem globais), estes podem ser desprezados se a condição seguinte for satisfeita:

$$\bullet \quad \alpha_{cr} \geq 10, \text{ para a análise elástica} \quad (2.1)$$

$$\bullet \quad \alpha_{cr} \geq 15, \text{ para a análise plástica} \quad (2.2)$$

onde α_{cr} é o parâmetro de carga crítica pelo qual as acções de cálculo têm de ser multiplicadas para provocar a instabilidade elástica num modo global.

De notar que na adopção de uma análise global plástica (unicamente em estruturas com secções transversais de classe 1), o valor limite de α_{cr} é superior ao da análise global elástica, o que se deve ao comportamento estrutural ser mais afectado pela não-linearidade material.

Quando as condições (2.1) e (2.2) não se verificam, a contabilização dos efeitos de 2ª ordem deve ser tida em conta, podendo os efeitos “P- Δ ” ser considerados de uma forma directa ou indirecta.

A classificação da estrutura e a contabilização dos efeitos de 2ª ordem (ilustrada na Figura 2.2), exigem a determinação do valor do parâmetro de carga crítica α_{cr} , podendo ser obtido através de uma análise linear de estabilidade, por via computacional. O EC3 apresenta expressões aproximadas para a determinação de α_{cr} . No caso de pórticos pode calcular-se α_{cr} através de

$$\alpha_{cr} = \min \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right)_{\text{piso } i} \quad (2.3)$$

onde:

- H_{Ed} – valor de cálculo da carga horizontal total, incluindo as forças equivalentes, transmitidas pelo piso;
- V_{Ed} – valor de cálculo da carga vertical total transmitida pelo piso;
- $\delta_{H,Ed}$ – deslocamento horizontal no topo do piso medido relativamente à sua base, considerando o carregamento horizontal (incluindo as cargas horizontais fictícias, devido às imperfeições globais);
- h – altura do piso i .

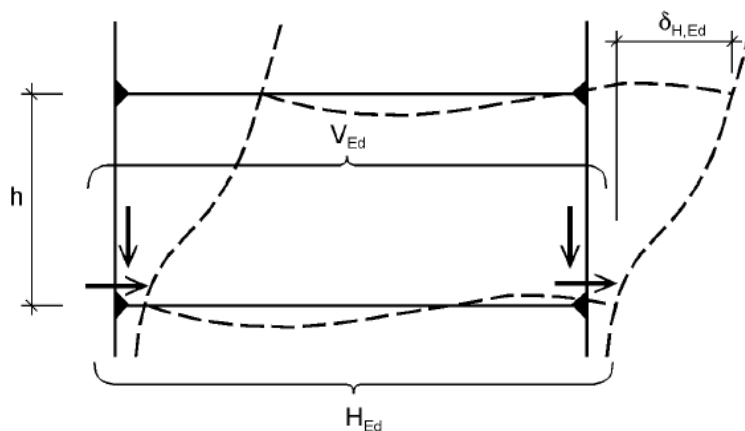


Figura 2.2 - Efeitos da configuração deformada da estrutura [Extraído do EC3]

2.2.1 Contabilização directa dos efeitos “P-Δ”

É realizada por uma análise global geometricamente não-linear (2ª ordem), recorrendo a programas de análise estrutural sofisticados. É necessário recorrer a estas análises no caso do parâmetro de carga crítico assumir valores muito baixos, ou seja,

$$\alpha_{cr} < 3 \quad (2.4)$$

2.2.2 Contabilização indirecta dos efeitos “P-Δ”

Os efeitos da não-linearidade geométrica são tidos em conta por meio de uma análise de 1ª ordem, procedendo-se a uma amplificação dos esforços actuantes. Para que esta análise seja utilizada, o regulamento exige que o parâmetro de carga crítico satisfaça a condição

$$\alpha_{cr} \geq 3 \quad (2.5)$$

Nesta situação, os efeitos de 2ª ordem (“P-Δ”), podem ser obtidos com a amplificação das cargas horizontais actuantes (tendo em conta a contabilização das cargas horizontais equivalentes às imperfeições do pórtico). O factor de amplificação é dado por

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \quad (2.6)$$

2.3 Consideração das imperfeições

A consideração das imperfeições é obtida a nível global (pórtico) e a nível dos elementos (barras).

As imperfeições globais compreendem uma inclinação inicial (ϕ) dos elementos verticais. Essa inclinação desenvolve-se no sentido mais desfavorável, i.e., no mesmo sentido dos deslocamentos provocados pelos carregamentos externos horizontais a que a estrutura está submetida. A determinação dessa inclinação faz-se pela expressão

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m \quad (2.7)$$

onde:

- $\phi_0 = \frac{1}{200}$;
- $\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}$, é um factor de redução que toma em consideração a altura total da estrutura (h), em que o valor deve estar entre o intervalo $\frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$;
- $\alpha_m = \sqrt{0.5(1 + \frac{1}{m})}$, é um factor de redução que toma em consideração o número de colunas num piso (m) com esforço axial $N_{Ed} \geq 50\%$ do valor médio do esforço axial.

O EC3 permite a substituição da inclinação ϕ por um binário de forças horizontais equivalentes

$$F_i = \phi N_i \quad (2.8)$$

aplicadas ao nível de cada piso, em que N_i é o valor do esforço axial da barra sem imperfeições (“perfeita”). Com o uso deste procedimento torna-se possível analisar a estrutura com imperfeições (desviada relativamente à sua geometria “perfeita”), através da implementação de forças horizontais equivalentes na sua configuração indeformada (Figura 2.3).

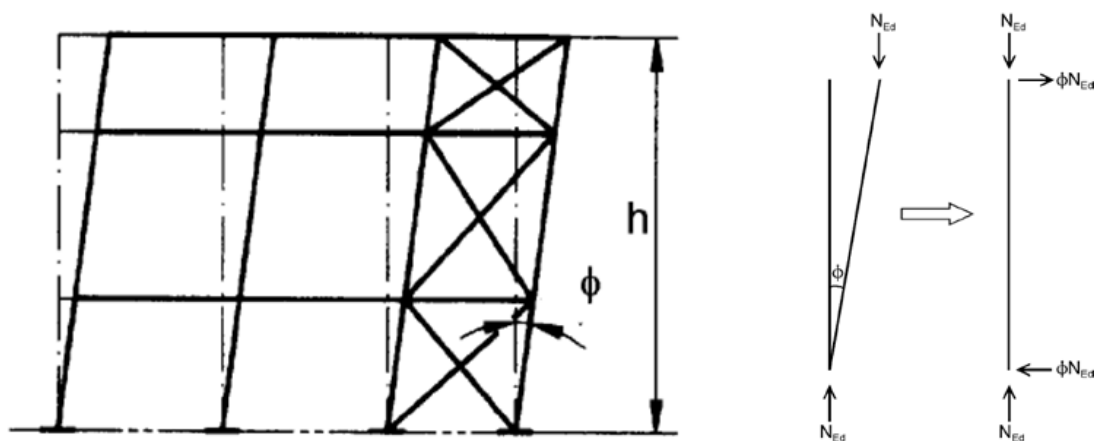


Figura 2.3 - Imperfeição global da estrutura (ϕ) e forças horizontais equivalentes [Extraído do EC3]

O regulamento permite dispensar a consideração das imperfeições globais das estruturas se

$$H_{Ed} \geq 0.15V_{Ed} \quad (2.9)$$

onde H_{Ed} são as forças horizontais provenientes das combinações de acções, e V_{Ed} as forças verticais. Isto acontece quando se verificam elevados valores para H_{Ed} (resultantes da soma das forças horizontais provenientes das combinações de acções). Assim, as forças equivalentes tornam-se desprezáveis face a H_{Ed} .

As imperfeições locais das barras, de amplitude e_0 , cujo valor pode ser obtido através de tabelas disponibilizadas no EC3, variam com a curva de dimensionamento e com o tipo de análise global (elástica ou plástica). Também neste caso, as imperfeições podem ser tidas em conta através de sistemas de forças transversais equivalentes, com uma carga uniformemente distribuída, conforme mostra a Figura 2.4.

Neste trabalho, os efeitos das imperfeições locais das barras são tidos em consideração através das expressões de verificação da resistência à encurvadura, tal como será discutido em seguida.

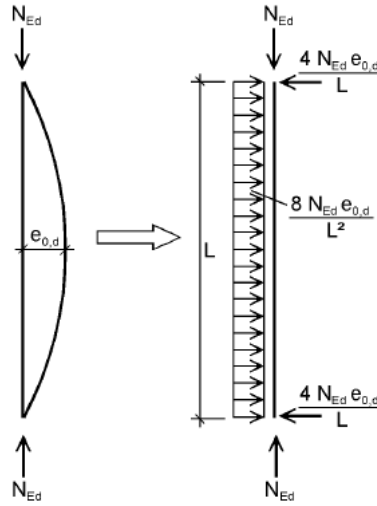


Figura 2.4 - Imperfeição local da barra (e_0) e forças horizontais equivalentes [Extraído do EC3]

2.4 Verificação da segurança das estruturas

Determinados os esforços actuantes na estrutura, é necessário proceder-se em seguida à análise de verificação da segurança. Esta verificação compreende (i) as secções transversais e (ii) as barras.

2.4.1 Colunas

2.4.1.1 Tracção

A presença isolada do esforço axial de tracção associado à tensão normal actuante na secção transversal requer a sua verificação à segurança através da relação

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \leq 1 \quad (2.10)$$

onde N_{Ed} é o esforço axial actuante, e N_{Rd} é o esforço axial resistente dado por

$$N_{Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.11)$$

em que A representa o valor da área bruta da secção, f_y a tensão de cedência do material (aço) e γ_{M0} o coeficiente parcial de segurança ($\gamma_{M0} = 1$).

2.4.1.2 Compressão

Devido à possibilidade da ocorrência de fenómenos de instabilidade na coluna, torna-se necessário ter em consideração a redução da sua capacidade resistente, sendo feita através do factor de redução χ , ou seja,

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2.12)$$

onde γ_{M1} é o factor de segurança quando estão presentes fenómenos de encurvadura (à semelhança de γ_{M0} , $\gamma_{M1} = 1$). O factor de redução χ é dado pela expressão

$$\chi = \frac{1}{\Phi + (\Phi^2 - \bar{\lambda}^2)^{1/2}} \leq 1 \quad (2.13)$$

onde os parâmetros Φ e $\bar{\lambda}$ (esbelteza normalizada da coluna) são dados por

$$\Phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (2.14)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{L_e/i}{\pi(E/f_y)^{1/2}} \quad (2.15)$$

para a encurvadura por flexão, onde N_{cr} é o valor crítico do esforço axial da coluna, associado ao modo de encurvadura elástica, i o raio de giração da secção transversal, e L_e o comprimento de encurvadura do elemento. As encurvaduras por torção e por flexão-torção não foram consideradas neste trabalho.

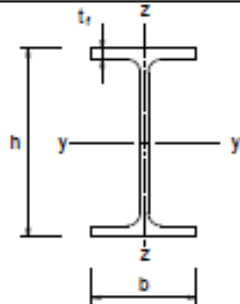
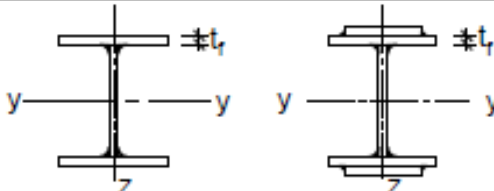

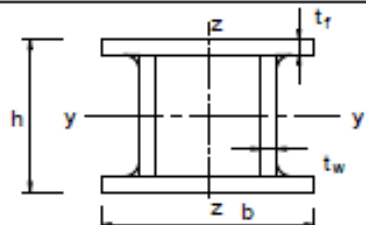
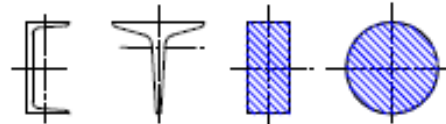

O parâmetro de imperfeição α traduz as imperfeições do material (aço), determinado através da geometria, eixo de flexão e processo de fabrico do perfil. A determinação deste parâmetro no EC3 é feita através da Tabela 2.3, tendo em conta as curvas de dimensionamento de colunas (Figura 2.5) a adoptar para a geometria da secção transversal do elemento (Tabela 2.4).

Note-se que para valores da esbelteza normalizada do elemento para a instabilidade por flexão $\bar{\lambda} \leq 0,2$, o EC3 admite que os efeitos da encurvadura por flexão poderão ser ignorados, tal como é possível observar pelas curvas de dimensionamento de colunas (Figura 2.5).

Tabela 2.3 - Valores do factor de imperfeição α para as diferentes curvas adoptadas para o dimensionamento de colunas [Extraído do EC3]

Curva de encurvadura	a ₀	a	b	c	d
Factor de imperfeição α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabela 2.4 - Escolha da curva de encurvadura em função da secção transversal [Extraído do EC3]

Secção transversal		Limites		Encurvadura em relação ao eixo	Curva de encurvadura	
					S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Perfis laminados		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	a b	a ₀ a ₀
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c	a a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y - y z - z	d d	c c
Perfis I soldados		$t_f \leq 40 \text{ mm}$		y - y z - z	b c	b c
		$t_f > 40 \text{ mm}$		y - y z - z	c d	c d
Secções tubulares		acabadas a quente		qualquer	a	a ₀
		enformadas a frio		qualquer	c	c
Secções em caixão soldadas		em geral (excepto como abaixo indicado)		qualquer	b	b
		soldaduras espessas: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$		qualquer	c	c
Perfis U, T e secções cheias				qualquer	c	c
Canton eiras				qualquer	b	b

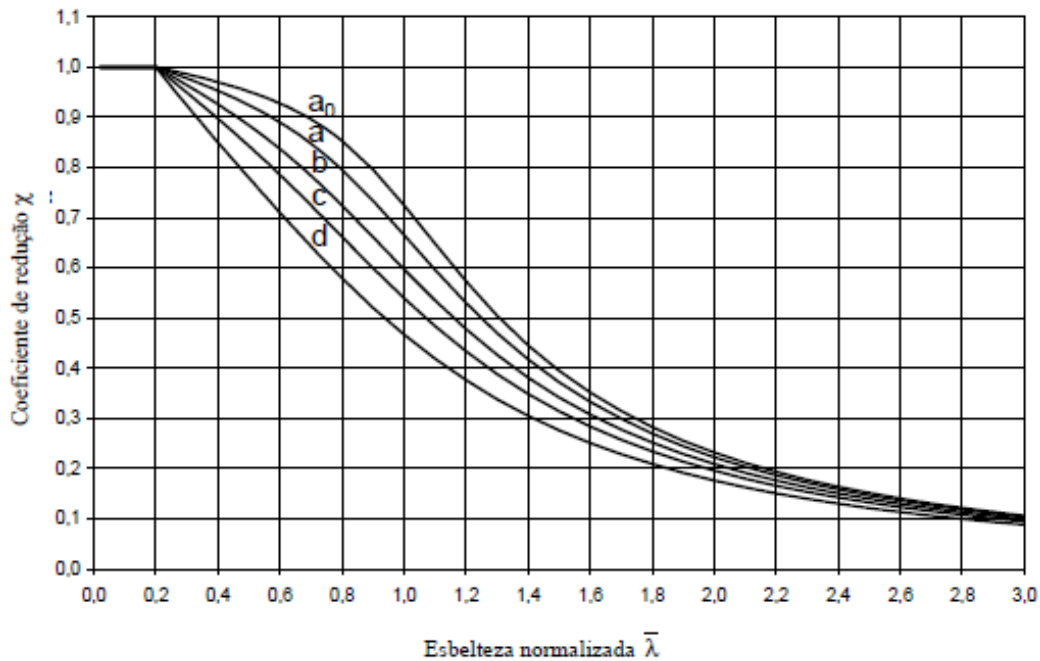


Figura 2.5 - Curvas europeias de dimensionamento de colunas [Extraído do EC3]

2.4.2 Vigas

2.4.2.1 Esforço transversal

A verificação da segurança da secção ao esforço transversal é dada por

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1 \quad (2.16)$$

onde V_{Ed} é o esforço transversal actuante e $V_{c,Rd}$ o esforço transversal resistente. No caso do cálculo plástico, i.e., para uma distribuição plástica de tensões tangenciais numa secção, tem-se

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (2.17)$$

onde $V_{pl,Rd}$ é o esforço transversal plástico resistente e A_v a área de corte da secção, dependendo da geometria da secção, processo de fabrico e eixo de corte solicitado. Assim, a área resistente ao esforço transversal (A_v) pode ser calculada do seguinte modo:

- para secções laminadas I e H , com carga paralela à alma $A - 2bt_f + (t_w - 2r)t_f$
- para secções laminadas rectangulares de espessura uniforme:
 - com carga paralela à altura $\frac{Ah}{b+h}$
 - com carga paralela à largura $\frac{Ab}{b+h}$

Apesar do EC3 possibilitar a determinação da resistência ao esforço transversal com base numa distribuição elástica de tensões tangenciais na secção, esse facto não será abordado neste trabalho.

Os efeitos do esforço transversal actuante (V_{Ed}) também não são tidos em consideração para o cálculo do momento flector resistente neste trabalho, assumindo-se que os seus valores são inferiores a metade do valor da resistência plástica ao esforço transversal ($V_{pl,Rd}$).

2.4.2.2 Momento flector

Quando se verifica a presença isolada de momento flector, à semelhança dos esforços anteriormente anunciados, a verificação é

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \quad (2.18)$$

em que M_{Ed} é o momento flector actuante e $M_{c,Rd}$ o momento flector resistente. Consoante a classe da secção transversal, o EC3 assume diferentes expressões para o cálculo do momento resistente das vigas, sendo dado por

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{para as secções transversais de Classe 1 ou 2} \quad (2.19)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{para as secções transversais de Classe 3} \quad (2.20)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{para as secções transversais de Classe 4} \quad (2.21)$$

onde W_{pl} e W_{el} são os módulos de flexão plástico e elástico respectivamente, e $W_{eff,min}$ o módulo elástico de flexão mínimo da secção efectiva reduzida.

A actuação isolada do momento flector numa barra pode suscitar a ocorrência de fenómenos de instabilidade lateral por flexão-torção. À semelhança das colunas, torna-se necessário ter em consideração a redução da sua capacidade resistente, sendo feita através do factor de redução χ_{LT} , ou seja,

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_y f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.22)$$

em que $W_y = W_{pl,y}$ para secções transversais de classe 1 e 2;

$W_y = W_{el,y}$ para secções transversais de classe 3;

$W_y = W_{eff,y}$ para secções transversais de classe 4.

O coeficiente de redução da resistência para a instabilidade lateral por flexão-torção χ_{LT} é dado por

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + (\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2)^{1/2}} \leq 1 \quad (2.23)$$

onde os parâmetros Φ_{LT} e $\bar{\lambda}_{LT}$ (esbelteza normalizada para a instabilidade lateral por flexão-torção) são dados por

$$\Phi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (2.24)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{Rd}}{M_{cr}}} \quad (2.25)$$

onde α_{LT} é o parâmetro de imperfeição e M_{cr} o momento crítico elástico da viga.

O parâmetro de imperfeição α_{LT} é determinado tendo em consideração a geometria e processo de fabrico do perfil, tal como demonstra a Tabela 2.5,

Tabela 2.5 - Curvas recomendadas para o dimensionamento de vigas [Extraído do EC3]

<i>Secção transversal</i>	<i>Limites</i>	<i>Curva de encurvadura</i>
<i>Secções em I laminadas</i>	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
<i>Secções em I soldadas</i>	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
<i>Outras secções transversais</i>	-	d

obtendo-se o valor do factor de imperfeição α_{LT} correspondente às diferentes curvas de dimensionamento das vigas (χ_{LT} vs. $\bar{\lambda}_{LT}$), valores esses apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Valores do factor de imperfeição α_{LT} para as diferentes curvas adoptadas para o dimensionamento de vigas [Extraído do EC3]

<i>Curva de encurvadura</i>	a	b	c	d
<i>Factor de imperfeição α_{LT}</i>	0,21	0,34	0,49	0,76

Note-se que para valores da esbelteza normalizada do elemento para a instabilidade lateral por flexão-torção $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$, o EC3 admite que os efeitos da encurvadura lateral por flexão-torção poderão ser ignorados.

A determinação do momento crítico pode ser feita aproximadamente através da expressão

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L)^2} \left(\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g)^2} - (C_2 z_g) \right) \quad (2.26)$$

onde I_t é a rigidez de torção (Saint-Venant), I_w a constante de empenamento da secção transversal, I_z a inércia em torno do eixo z, z_g a distancia do ponto de aplicação da força ao eixo da peça (metade da altura do perfil para peças simétricas em ambos os eixos), L o comprimento da viga entre pontos com restrições laterais (contraventamentos), k_z um coeficiente que traduz as condições de apoio da viga ($k_z = 0,5$ para encastramento em ambas as extremidades da viga, $k_z = 0,7$ para encastramento numa das extremidades da viga e $k_z = 1$ para ausência de restrições de rotação nas extremidades da viga), k_w um coeficiente que traduz o grau de impedimento ao empenamento, e C_1 e C_2 factores que dependem da forma do carregamento e condições de apoio das vigas. É aplicável a elementos

submetidos a flexão em torno do eixo de maior inércia da sua secção transversal (eixo y), com perfis simétricos em ambos os eixos (y e z), e com diferentes condições de apoio e carregamento.

2.4.3 Colunas-viga

Quando uma barra está submetida à actuação conjunta de compressão axial e flexão, está-se na presença de uma coluna-viga.

Segundo o EC3, as fórmulas de interacção para a verificação à encurvadura de colunas-viga solicitadas à flexão composta são

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{m1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{m1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{m1}}} \leq 1 \quad (2.27)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{m1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{m1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{m1}}} \leq 1 \quad (2.28)$$

onde k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} são os factores de interacção, e embora o EC3 proponha dois métodos distintos para o seu cálculo (Método 1 e Método 2), apenas será abordado neste trabalho o Método 2.

O EC3 faz a distinção entre colunas-viga relativamente à susceptibilidade às deformações por torção (ver Tabelas 2.7 e 2.8), admitindo que colunas-viga de secções rectangulares (*SHS* e *RHS*) não são susceptíveis às deformações por torção. Quanto a colunas-viga com secções *I* e *H* não contraventadas, devem ser classificadas como susceptíveis a deformações por torção (Boissonnade *et al.*, 2006).

As colunas-viga podem adoptar dois tipos de comportamentos nas suas análises, sendo eles:

- Comportamento plano
- Comportamento espacial

A distinção entre elas está nos fenómenos de instabilidade presentes, sendo que no primeiro caso (comportamento plano), quer por via de contraventamentos laterais das barras, i.e., na restrição de deformações na direcção z , quer pelo tipo de perfil adoptado, a encurvadura por flexão (em torno de y) apresenta-se como o único fenómeno de instabilidade presente.

Quanto ao comportamento espacial, os fenómenos de instabilidade a ter em consideração são a encurvadura em torno de ambos os eixos da secção transversal (y e z) e a instabilidade lateral por flexão-torção.

Tabela 2.7 - Factores de interacção k_{ij} do Método 2 para colunas-viga não susceptíveis a torção [Extraído do EC3]

Factores de interacção	Tipo de secções	Hipóteses de cálculo	
		Propriedades elásticas das secções transversais Classe 3, Classe 4	Propriedades plásticas das secções transversais Classe 1, Classe 2
k_{yy}	Secções em I Secções tubulares rectangulares	$C_{my} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
k_{yz}	Secções em I Secções tubulares rectangulares	k_{zz}	$0,6 k_{zz}$
k_{zy}	Secções em I Secções tubulares rectangulares	$0,8 k_{yy}$	$0,6 k_{yy}$
k_{zz}	Secções em I	$C_{mz} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	Secções tubulares rectangulares		$C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
Para secções em I e H e para secções tubulares rectangulares submetidas a compressão axial e a flexão recta $M_{y,Ed}$, o factor k_{zy} poderá considerar-se $k_{zy} = 0$.			

Tabela 2.8 - Factores de interacção k_{ij} do Método 2 para colunas-viga susceptíveis a torção [Extraído do EC3]


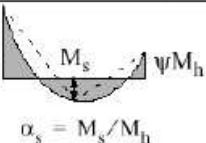
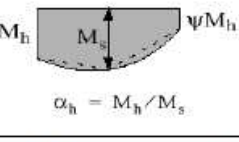
Factores de interacção	Hipóteses de cálculo	
	Propriedades elásticas das secções transversais Classe 3, Classe 4	Propriedades plásticas das secções transversais Classe 1, Classe 2
k_{yy}	k_{yy} do Quadro B.1	k_{yy} do Quadro B.1
k_{yz}	k_{yz} do Quadro B.1	k_{yz} do Quadro B.1
k_{zy}	$\left[1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} \right]$	$\left[1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} \right]$ para $\bar{\lambda}_z < 0,4$: $k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}}$
k_{zz}	k_{zz} do Quadro B.1	k_{zz} do Quadro B.1

Na verificação da segurança das colunas-viga é necessário ter em consideração os momentos de 2ª ordem, gerados pela actuação do esforço axial na configuração deformada do elemento. Estes causam a amplificação dos momentos flectores de primeira ordem (calculados na configuração indeformada da estrutura). Contudo, a localização da secção mais solicitada da coluna-viga é um problema de difícil resolução. Para evitar determinar essa localização, o momento máximo de segunda ordem é normalmente calculado através da expressão

$$M_{Ed\ max}^{II} = \frac{C_m M_{Ed\ max}^I}{\cos \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \right)} \quad (2.29)$$

onde N_{cr} é o valor da carga crítica, $M_{Ed\ max}^I$ é o momento flector máximo de 1ª ordem e C_m é o factor de momento uniforme equivalente, o qual é tabelado para diversos casos (e.g., Reis e Camotim, 2001). Para o cálculo deste factor, o EC3 fornece as expressões indicadas na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Factores de momento uniforme equivalente C_m [Extraído do EC3]

Diagrama de momentos	Domínio de aplicação		C_{my} e C_{mz} e C_{mLT}	
			Carga uniforme	Carga concentrada
	$-1 \leq \psi \leq 1$		$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
 $\alpha_s = M_s/M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
 $\alpha_h = M_h/M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$	$0,90 + 0,10\alpha_h(1+2\psi)$
Em elementos com modos de encurvadura associados a deslocamentos laterais, o coeficiente de momento uniforme equivalente deverá tomar-se igual a $C_{my} = 0,9$ ou $C_{mz} = 0,9$, respectivamente.				
C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} deverão ser obtidos de acordo com o diagrama dos momentos flectores actuantes entre as secções de travamento, de acordo com:				
coeficiente de momento	eixo de flexão	travamento na direcção		
C_{my}	y-y	z-z		
C_{mz}	z-z	y-y		
C_{mLT}	y-y	y-y		

2.4.3.1 Verificação das secções de extremidade

Para além das verificações anteriores, o EC3 também exige a verificação da resistência das secções transversais nas extremidades das colunas-viga. Serão unicamente abordadas neste trabalho as

verificações relativas às secções de classe 1 e 2 (onde a resistência plástica é adoptada). Assim, para estas classes deve ser verificada a condição

$$M_{N,Rd} \leq M_{pl,Rd} \quad (2.30)$$

onde $M_{N,Rd}$ é o momento plástico reduzido pela presença do esforço axial N . O cálculo do valor do momento reduzido $M_{N,Rd}$ é efectuada da seguinte forma:

i. Para perfis com dupla simetria (I e H) tem-se

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \left(\frac{1-n}{1-0,5a} \right) \quad (2.31)$$

$$\bullet \text{ para } n \leq a: \quad M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \quad (2.32)$$

$$\bullet \text{ para } n > a: \quad M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] \quad (2.33)$$

onde os parâmetros n e a são definidos pelas expressões,

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad (2.34)$$

$$a = \min \left\{ \frac{(A - 2 b_f t_f)}{A}; 0,5 \right\} \quad (2.35)$$

sendo A e $N_{pl,Rd}$ a área e o esforço axial plástico resistente da secção, e b_f e t_f a largura e espessura dos seus banzos.

ii. Para perfis tubulares de secção rectangular quadrada (RHS e SHS):

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \frac{1-n}{1-0,5a_w} \quad (2.36)$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \frac{1-n}{1-0,5a_f} \quad (2.37)$$

onde os parâmetros a_w e a_f são obtidos por:

$$a_w = \frac{A-2bt}{A} \text{ em que } a_w \leq 0,5 \quad (2.38)$$

$$a_f = \frac{A-2ht}{A} \text{ em que } a_f \leq 0,5 \quad (2.39)$$

sendo b e h a largura e comprimento do perfil, e t a sua espessura (regular em todo o perfil).

O EC3 estipula que $M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ para perfis com dupla simetria (I e H) e com secções tubulares (SHS e RHS), i.e., despreza-se a redução do momento devido a N no eixo y da secção transversal, caso se verifiquem em simultâneo as condições

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd} \quad (2.40)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \ h_w \ t_w \ f_y}{\gamma_{m0}} \quad (2.41)$$

onde h_w e t_w são a altura e espessura da alma. Relativamente ao eixo z , o EC3 despreza a redução do momento devido a N , para perfis com dupla simetria (I e H), e assim $M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ caso se verifique a condição

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w \ t_w \ f_y}{\gamma_{m0}} \quad (2.42)$$

Por último, na presença simultânea de momentos em ambos os eixos y e z das secções transversais das colunas-viga, exige-se a verificação da expressão

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1 \quad (2.43)$$

onde α e β são constantes e assumem valores consoante o tipo de perfil em questão. Assim:

- Para perfis com dupla simetria (I e H) tem-se:

$$\alpha = 2; \beta = 5n \quad \text{para } \beta \geq 1 \quad (2.44)$$

- Para perfis tubulares de secção rectangular quadrada (RHS e SHS):

$$\alpha = \beta = \frac{1,66}{1 - 1,13n^2} \quad \text{para } \alpha = \beta \leq 6 \quad (2.45)$$

3 FERRAMENTA DE CÁLCULO

Este capítulo tem como objectivo a apresentação da ferramenta de cálculo elaborada para a verificação automática da segurança de elementos (barras) recorrendo às fórmulas do EC3, enunciadas no capítulo anterior.

O programa escolhido para a elaboração da ferramenta de cálculo foi o “Microsoft Office Access 2007”. A sua escolha teve em conta vários factores, tais como (i) a possibilidade de este programa ser utilizado como base de dados, permitindo o armazenamento de um elevado número de parâmetros, (ii) a capacidade em relacionar várias variáveis simultaneamente e de forma repetitiva, (iii) a sua “agradável” apresentação aliada ao seu fácil manuseamento por parte do utilizador e, por fim, (iv) pelo facto de este programa estar presente na grande maioria dos computadores, apesar de poder ser pouco conhecido por parte dos engenheiros projectista.

Para uma melhor compreensão e manuseamento da ferramenta de cálculo, neste capítulo será dado a conhecer a forma com que a mesma se apresenta ao utilizador, o seu modo de funcionamento e as suas potencialidades. Serão abordados alguns exemplos de colunas-viga, unicamente com o objectivo de demonstrar como são revelados os seus resultados e como é que a ferramenta os interpreta, para que assim o utilizador saiba que resultados pode obter através da sua utilização.

Para o conhecimento da elaboração (programação) desta ferramenta de cálculo, o Anexo A revela como a ferramenta executa os seus procedimentos. Pretende-se assim que o utilizador fique com maior consciência das suas potencialidades e limitações.

3.1 “Menu Entrada”

O menu apresenta-se como o “ambiente de trabalho” da ferramenta de cálculo, onde estão disponíveis os vários ícones que dão acesso às suas funcionalidades.



Figura 3.1 – “Menu Entrada”

Como se pode verificar na Figura 3.1 existem vários botões com funcionalidades específicas, sendo elas:

- i. Botão “Definir Peça/Estrutura”, que dá acesso à “folha de dados” para definição das variáveis que caracterizam os elementos a serem verificados;
- ii. Botão “Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura”, que dá acesso ao “Relatório” que indica os valores dos parâmetros relativos à resistência da secção, momento crítico e encurvadura por flexão e por flexão-torção (lateral) que caracterizam o(s) elemento(s) em análise;
- iii. Botão “Verificação Final”, que dá acesso ao “Relatório” que indica os valores dos parâmetros relativos às verificações dos elementos em análise;
- iv. Botão “Ajuda!”, que dá acesso à “Caixa de Mensagem” que tem como objectivo informar o utilizador do modo de funcionamento da ferramenta de cálculo. Esta dá acesso a uma informação rápida e sucinta de como o utilizador pode tirar o máximo partido das funcionalidades oferecidas.

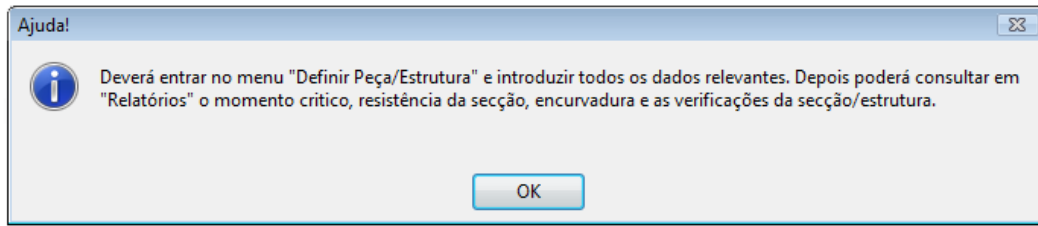


Figura 3.2 – “Caixa de Mensagem” (Ajuda!) do “Menu Entrada”

A “caixa de Mensagem” indica que o utilizador deve entrar no item “Definir Peça/Estrutura” como forma de definir e seleccionar o(s) elemento(s) a serem posteriormente analisados. Para conhecer os resultados da sua análise, o utilizador tem que regressar ao “Menu Entrada”, para poder aceder aos “Relatórios” (“Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura” e “Verificação Final”).

- v. Botão “Fechar Programa”, representado por um “x”, tem como função encerrar o programa.

3.2 “Definir Peça/Estrutura”

Após se ter acedido ao item “Definir Peça/Estrutura”, é disponibilizada uma “folha de dados” para que sejam introduzidos todos os parâmetros relevantes que caracterizam o(s) elemento(s) a serem posteriormente analisados.

 A screenshot of the "Definir Peça/Estrutura" (Define Piece/Structure) form within a software application. The form has a title bar "Verificação Automática de Colunas-Viga de acordo com o Eurocódigo 3 - (Método 2)". The main area is titled "Definir Peça/Estrutura" and includes a sub-header "Definir Peça/Estrutura (Modo Excel)". Below this, there are several input fields and a table. The "Nome Peça" field is set to "HE 100 AA". The "fy" field is set to "235". The "Resistência Secção" dropdown is set to "Plástica". A table with 12 columns and 2 rows is shown. The first row contains values: 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0. The second row contains values: 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0. The "Mcr" cell in the first row is highlighted with a red box. To the right of the table is a "Seleccionar" checkbox and an "Apagar" button. The bottom status bar shows "Registo: 1 de 1" and "Pesquisar".

Figura 3.3 - “Definir Peça/Estrutura”

Como se pode verificar na Figura 3.3, esta “folha de dados” apresenta diferentes botões tais como:

- i. Botão “Ajuda!”, que dá acesso à “Caixa de Mensagem” com a função de informar o utilizador relativamente ao modo de funcionamento da “folha de dados”;

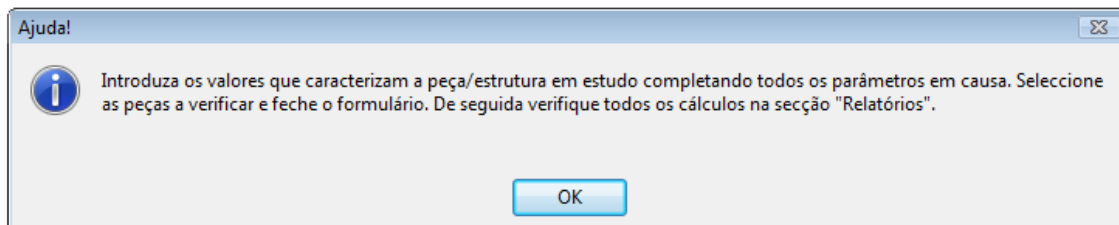


Figura 3.4 – “Caixa de mensagem” (Ajuda!) de “Definir Peça/Estrutura”

A “Caixa de Mensagem” (Figura 3.4) indica que o utilizador deve introduzir valores em todos os parâmetros (incluindo o valor zero “0” para os parâmetros considerados nulos). Após a definição e selecção das barras pretendidas para análise, o utilizador deve verificar os seus resultados na secção “Relatórios”;

- ii. Botão “Fechar”, com a função de fechar a “folha de dados”, podendo o utilizador regressar ao “Menu Entrada”, e assim ter acesso aos itens correspondentes a “Relatórios”.
- iii. Botão “Definir Peça/Estrutura (Modo Excel)”, com a função de dar acesso a uma “folha de dados” para introdução das variáveis que caracterizam o(s) elemento(s) para análise, com a particularidade de estes se apresentarem com uma disposição semelhante à de uma tabela do “Microsoft Office Excel”.

3.2.1 Modo de funcionamento da “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura”

No item “Definir Peça/Estrutura”, é fornecida uma tabela de introdução de dados referente a cada elemento a ser analisado. À medida que são preenchidas as tabelas, uma nova tabela “em branco” é disponibilizada automaticamente.

Na Figura 3.5 é apresentado o formato com que esta tabela se apresenta ao utilizador.

 The image shows a software interface for defining a structural member. It includes several input fields and a table.
 - Fields: "Nome Peça", "Perfil" (dropdown with "HE 100 AA"), "fy" (dropdown with "235"), "yM0" (dropdown with "1"), "yM1" (dropdown with "1"), "Resistência Secção" (dropdown with "Plástica").
 - A table with columns: "Suscep. Torção" (dropdown with "Sim"), "Iz", "Iy", "C1", "C2", "L", "Mcr" (radio button), "Lcr,y", "Lcr,z", "NEd", "MyEd", "MzEd", "MyEd_ext", "MzEd_ext", "Cmy", "Cmz", "CmLT".
 - A "Selecionar" checkbox and an "Apagar" button are on the right.
 - A red rectangle highlights the "Iz", "Iy", "C1", "C2", "L", and "Mcr" columns and their respective input cells.

Figura 3.5 - Tabela da folha de dados “Definir Peça/Estrutura”

O utilizador ao encontrar-se neste item, tem obrigatoriamente que definir todas as variáveis para que a ferramenta de cálculo possa assim proceder à análise (se algum parâmetro é nulo tem que ser indicado o valor zero -“0”). Caso este procedimento não seja cumprido, uma “caixa de mensagem” dará a indicação ao utilizador de que deve digitar um valor para o parâmetro em falta.

Em seguida apresentam-se as particularidades a ter em conta em cada um dos parâmetros da “folha de dados” (“Definir Peça/Estrutura”).

3.2.1.1 Parâmetro – “Nome Peça”

Este parâmetro tem a função de atribuir uma designação a cada elemento em análise, para que se possam distinguir rapidamente os diferentes elementos. É possível utilizar a mesma designação para várias barras, sendo que neste caso os resultados apresentam-se pela ordem de introdução destas barras.

Caso este parâmetro não seja definido, o utilizador é deparado com a “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.6.

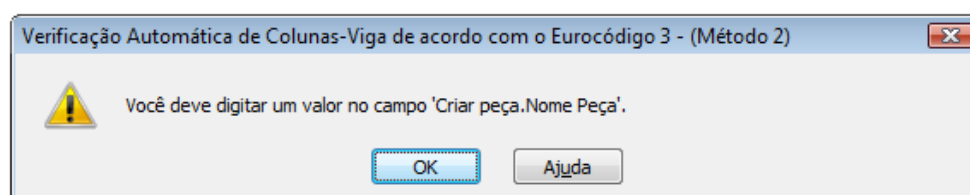


Figura 3.6 – “Caixa de mensagem” exibida quando o utilizador não define o parâmetro “Nome Peça”

3.2.1.2 Parâmetro – “Perfil”

Este parâmetro tem a função de definir o tipo de perfil a adoptar para a secção transversal da peça em análise, sendo a escolha limitada aos perfis em I , H , SHS e RHS homologados (valores de perfis retirados de http://www.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Estruturas/Estruturas_metalicas/).

Os parâmetros geométricos que caracterizam os perfis seguem a relação que está representada na Figura 3.7.

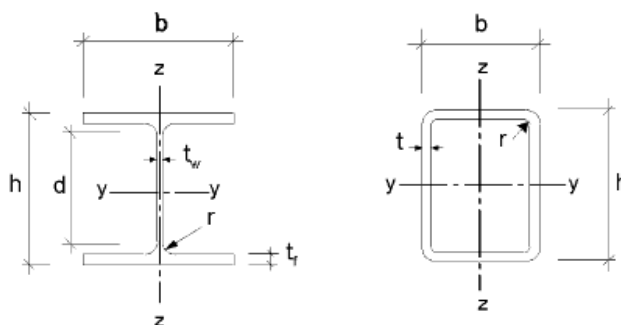


Figura 3.7 - Geometria, dimensões e eixos coordenados das secções em I , H , SHS e RHS [Extraído do EC3]

3.2.1.3 Parâmetro – “fy”

Este parâmetro tem a função de definir a classe do aço da peça em análise, i.e., o valor da tensão de cedência do material (aço). Este parâmetro está limitado à adopção dos valores preconizados no EC3 parte 1-1 sendo eles: 235, 275, 355, 420 e 460 (MPa). Caso seja introduzido um valor diferente dos permitidos, o utilizador depara-se com “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.8.

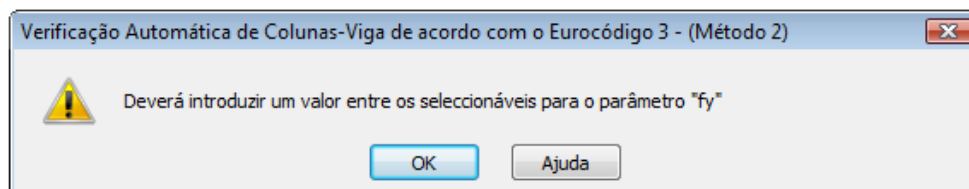


Figura 3.8 – “Caixa de mensagem” para valores não seleccionáveis para o parâmetro “fy”

3.2.1.4 Parâmetros – “ γ_{M0} ” e “ γ_{M1} ”

Estes parâmetros têm a função de definir os valores correspondentes aos factores parciais de segurança preconizados nas fórmulas do EC3 (γ_{M0} e γ_{M1}). Estes parâmetros não aceitam valores inferiores à unidade (1,0), apresentando a “caixa de mensagem” ilustrada pela Figura 3.9 quando o valor adoptado não se encontra de acordo com esta regra.

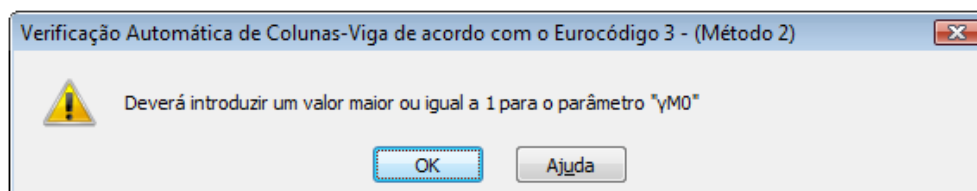


Figura 3.9 – “Caixa de mensagem” para valores não admitidos para o parâmetro “ γ_{M0} ” e “ γ_{M1} ”, respectivamente

Relativamente à precisão, estes parâmetros admitem valores até à ordem das unidades, e três algarismos decimais. Caso o valor introduzido não cumpra os requisitos para o número de algarismos não decimais anteriormente referido, a ferramenta de cálculo informará o utilizador da impossibilidade de adoptar esse valor através da “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.10.

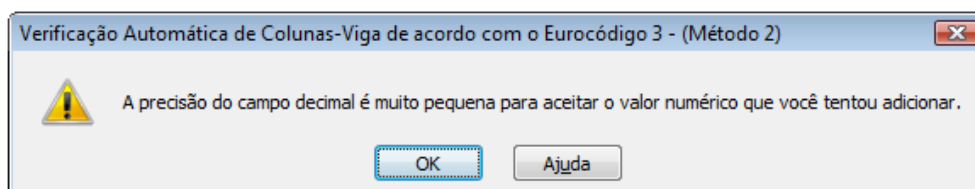


Figura 3.10 - Caixa de mensagem para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para os parâmetros “ γ_{M0} ” e “ γ_{M1} ”

3.2.1.5 Parâmetro – “Resistência Secção”

Este parâmetro tem a função de definir se a resistência da secção é plástica ou elástica. Caso seja introduzido um valor diferente das resistências mencionadas, o utilizador depara-se com a “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.11.

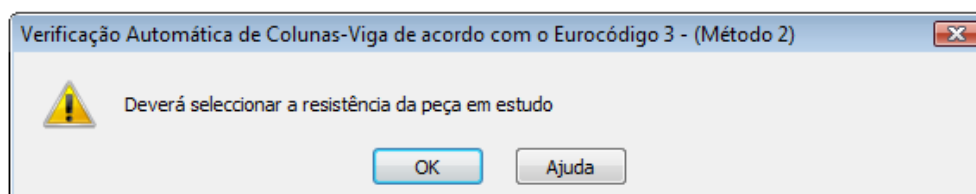


Figura 3.11 – “Caixa de mensagem” para valores não admitidos para o parâmetro “Resistência Secção”

3.2.1.6 Parâmetro – “Suscep. Torção”

Este parâmetro tem a função de definir se a peça é susceptível à torção ou não. Este parâmetro está por isso limitado a duas opções: “Sim” e “Não”, tal como é adoptado no EC3.

Caso seja introduzido um valor diferente daqueles que foram disponibilizados anteriormente, o utilizador depara-se com a “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.12.

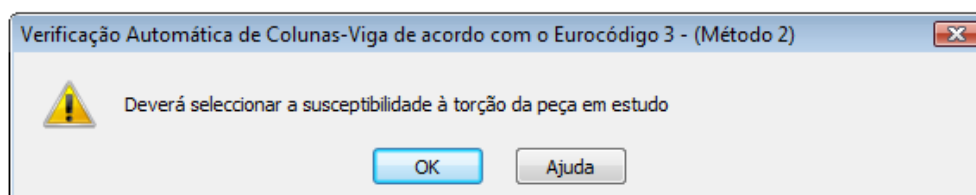


Figura 3.12 – “Caixa de mensagem” para valores não admitidos para o parâmetro “Suscep. Torção”

3.2.1.7 Momento Crítico

Os parâmetros representados na Figura 3.13 apresentam-se sobre uma “moldura vermelha e de fundo cinzento”, com a função de alertar o utilizador que a sua contabilização para a análise só será tida em conta caso seja definido para o parâmetro “Suscep. Torção” a opção “Sim”. Nesse caso, o utilizador tem que optar por um dos dois procedimentos:

- i. definir os valores correspondentes ao “primeiro quadro da moldura a vermelho” (parâmetros “kz”, “kw”, “C1”, “C2” e “L”), parâmetros que permitem definir o valor do momento crítico do elemento (ver secção 2.4.2.2);

- ii. definir explicitamente o valor do momento crítico, caso o utilizador o tenha obtido previamente, valor esse que deve ser introduzido no segundo quadro da “moldura a vermelho”, i.e., no parâmetro “Mcr”.

Caso o valor do parâmetro “Suscep. Torção” seja definido como “Não”, não faz sentido atribuir valores aos parâmetros anteriormente referidos (“kz”, “kw”, “C1”, “C2”, “L” e “Mcr”), porque não vão influenciar a análise do elemento.

No caso do perfil escolhido ser um perfil tubular, que pelas regras do EC3 (Método 2) não é susceptível à torção, cabe ao utilizador ter esse factor em conta, pois a ferramenta não o alertará previamente de tal facto.

Suscep. Torção	kz	kw	C1	C2	L	Mcr
123	1	1	0	0	0	0

Figura 3.13 - Parâmetros directamente relacionados com o parâmetro “Suscep. Torção”

3.2.1.7.1 Parâmetro – “kz”

Este parâmetro tem a função de definir o coeficiente de encurvadura associado à flexão em torno do eixo z. Este parâmetro apenas aceita valores entre 0,5 e 1. Caso seja introduzido um valor diferente daqueles que foram disponibilizados anteriormente, o utilizador depara-se com a “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.14.

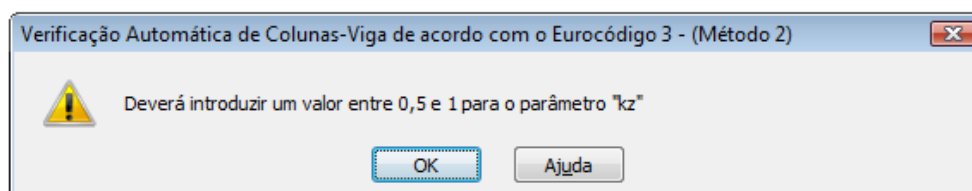


Figura 3.14 – “Caixa de mensagem” para valores não admitidos para o parâmetro “k_z”

3.2.1.7.2 Parâmetro – “kw”

Este parâmetro tem a função de definir o coeficiente que traduz o grau de impedimento ao empenamento do elemento conferido pelos apoios. Este parâmetro apenas aceita valores entre 0,5 e 1. Caso seja introduzido um valor que não se enquadre neste intervalo, o utilizador depara-se com a “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.15.

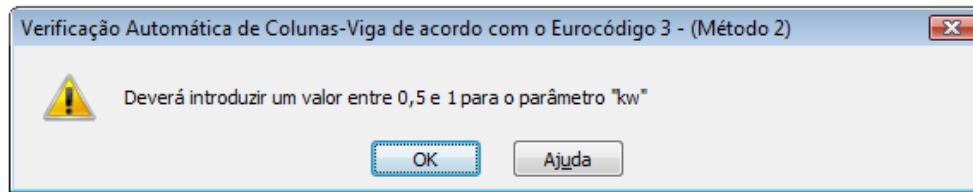


Figura 3.15 – “Caixa de mensagem” para valores não admitidos para o parâmetro “ k_w ”

3.2.1.7.3 Parâmetros – “ C_1 ” e “ C_2 ”

Estes parâmetros têm a função de definir os factores que reflectem a influência do carregamento e condições de apoio dos elementos. Estes parâmetros não aceitam valores negativos, apresentando a “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.16, para valores que não se encontram de acordo com esta regra.

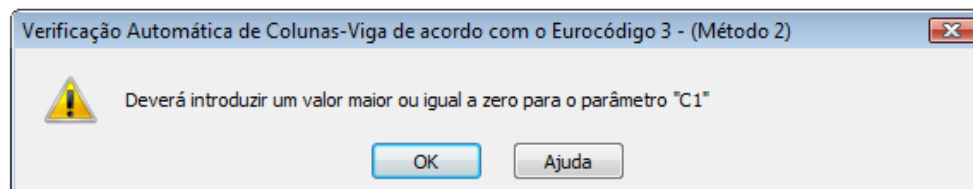


Figura 3.16 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para o parâmetro “ C_1 ”, e “ C_2 ” respectivamente

Relativamente à precisão, estes parâmetros admitem valores até à ordem das unidades, e três algarismos decimais. Caso o valor introduzido não cumpra os requisitos para o número de algarismos não decimais anteriormente referido, a ferramenta de cálculo informará o utilizador da impossibilidade de adoptar esse valor através da “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.17.

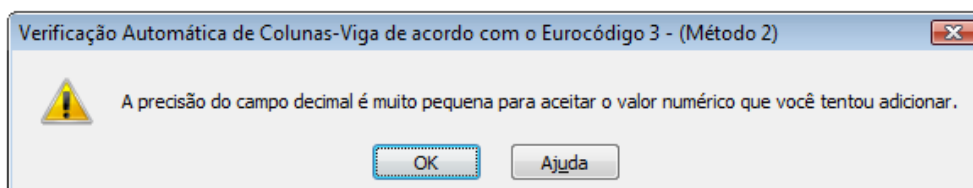


Figura 3.17 – “Caixa de mensagem” para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para os parâmetros “ C_1 ” e “ C_2 ”

3.2.1.7.4 Parâmetro – “ L ”

Este parâmetro (na unidade S.I. metro - m), tem a função de definir o comprimento do elemento entre pontos com restrições a deslocamentos laterais (contraventamentos). Este parâmetro não aceita valores negativos, apresentando a “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.17 para valores que não se encontram de acordo com esta regra.

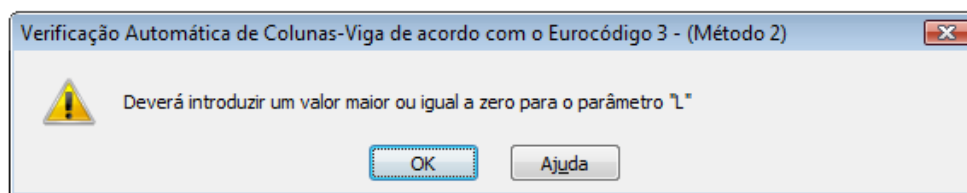


Figura 3.18 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para o parâmetro “L”

Relativamente à precisão, este parâmetro admite valores até à ordem das centenas, e três algarismos decimais. Caso o valor introduzido não cumpra os requisitos para o número de algarismos não decimais anteriormente referido, a ferramenta de cálculo informará o utilizador da impossibilidade de adoptar esse valor através da “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.19.

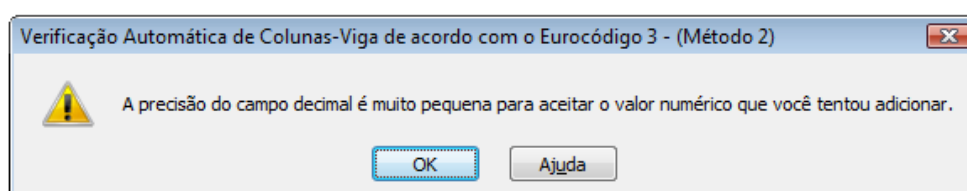


Figura 3.19 – “Caixa de mensagem” para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para o parâmetro “L”

3.2.1.7.5 Parâmetro – “Mcr”

Este parâmetro (nas unidades $kN.m$), tem a função de definir o momento crítico a adoptar na análise do elemento, caso se pretenda assumir um valor diferente daquele que seria obtido recorrendo à ferramenta de cálculo. Este parâmetro não aceita valores negativos, apresentando a “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.20, para valores que não se encontram de acordo com esta regra.

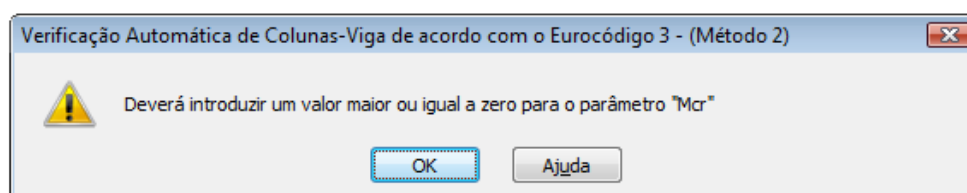


Figura 3.20 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para o parâmetro “Mcr”

Relativamente à precisão, este parâmetro admite valores até à ordem dos milhares, e dois algarismos decimais. Caso o valor introduzido não cumpra os requisitos para o número de algarismos não decimais anteriormente referido, a ferramenta de cálculo informará o utilizador da impossibilidade de adoptar esse valor através da “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.21.

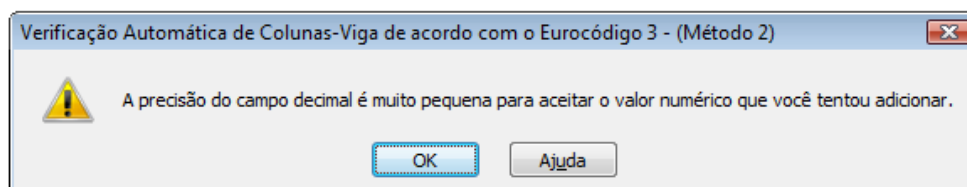


Figura 3.21 - “Caixa de mensagem” para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para o parâmetro “Mcr”

3.2.1.8 Parâmetros – “Lcr,y” e “Lcr,z”

Estes parâmetros (na unidade S.I. metro - m), são os comprimentos de encurvadura por flexão do elemento (à semelhança dos fenómenos de encurvadura ocorridos nas colunas) segundo os eixos y e z , respectivamente. Estes parâmetros não aceitam valores negativos, apresentando a “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.22, para valores que não se encontram de acordo com esta regra.

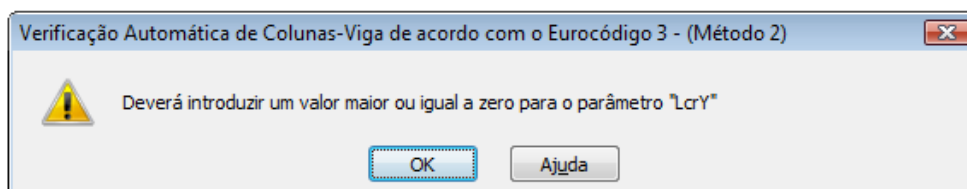


Figura 3.22 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para os parâmetros “Lcr,y”, e “Lcr,z” respectivamente

Relativamente à precisão, este parâmetro admite valores até à ordem das centenas, e três algarismos decimais. Caso o valor introduzido não cumpra os requisitos para o número de algarismos não decimais anteriormente referido, a ferramenta de cálculo informará o utilizador da impossibilidade de adoptar esse valor através da “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.23.

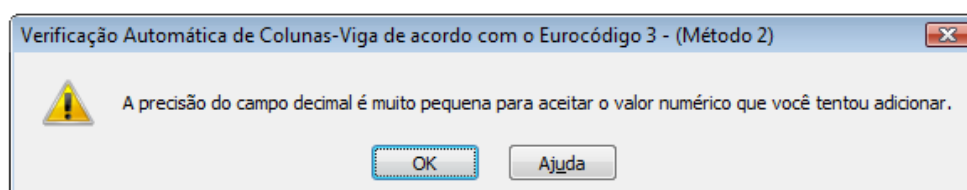


Figura 3.23 – “Caixa de mensagem” para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para os parâmetros “Lcr,y” e “Lcr,z”

3.2.1.9 Parâmetros – “NEd”, “MyEd” e “MzEd”

Estes parâmetros (nas unidades kN e $kN.m$), têm a função de definir os valores do esforço axial máximo e do momento flector máximo segundo o eixo y e z . Os valores assumidos para estes parâmetros devem ser sempre tomados como positivos, apresentando a “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.24, para valores que não se encontram de acordo com esta regra.

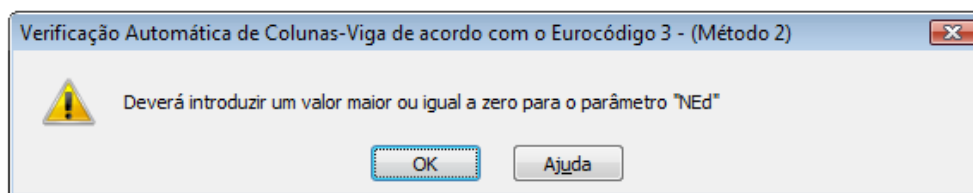


Figura 3.24 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para os parâmetros “NEd”, “MyEd” e “MzEd” respectivamente

Relativamente à precisão, este parâmetro admite valores até à ordem dos milhares, e dois algarismos decimais. Caso o valor introduzido não cumpra os requisitos para o número de algarismos não decimais anteriormente referido, a ferramenta de cálculo informará o utilizador da impossibilidade de adoptar esse valor através da “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.25.

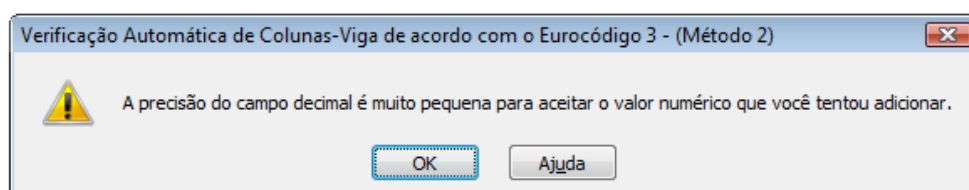


Figura 3.25 – “Caixa de mensagem” para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para os parâmetros “Ned”, “MyEd” e “MzEd”

3.2.1.10 Parâmetros – “MyEd,ext.” e “MzEd,ext.”

Estes parâmetros (nas unidades $kN.m$), têm a função de definir os valores máximos do momento flector nas extremidades do elemento em análise segundo os eixos y e z da sua secção transversal (momentos de extremidade). Os valores assumidos para estes parâmetros devem ser sempre os esforços verificados nas extremidades do elemento. Os valores assumidos para estes parâmetros devem ser sempre tomados como positivos, apresentando a “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.26, para valores que não se encontram de acordo com esta regra.

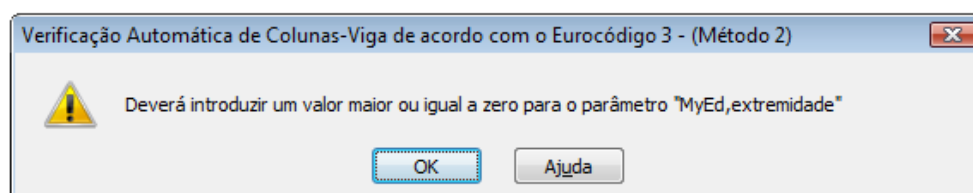


Figura 3.26 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para os parâmetros “MyEd,extremidade” e “MzEd,extremidade”, respectivamente

Relativamente à precisão, este parâmetro admite valores até à ordem dos milhares, e dois algarismos decimais. Caso o valor introduzido não cumpra os requisitos para o número de algarismos não decimais anteriormente referido, a ferramenta de cálculo informará o utilizador da impossibilidade de adoptar esse valor através da “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.27.

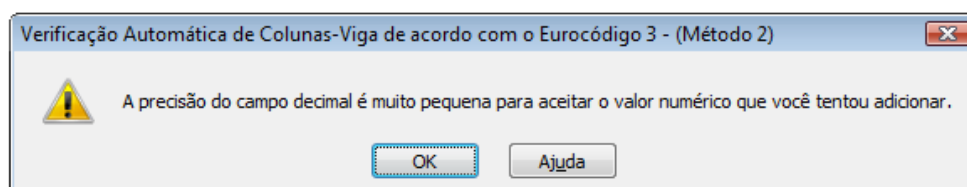


Figura 3.27 – “Caixa de mensagem” para valores menores que “zero” para os parâmetros “ $M_{yEd,extremidade}$ ” e “ $M_{zEd,extremidade}$ ”, respectivamente

3.2.1.11 Parâmetros – “ C_{my} ”, “ C_{mz} ” e “ C_{mLT} ”

Estes parâmetros têm a função de definir os valores dos factores de momento equivalente para a instabilidade por flexão segundo os eixos y e z da secção transversal do elemento (C_{my} e C_{mz}), tal como o factor de momento equivalente para a instabilidade lateral por flexão-torção (C_{mLT}). Estes parâmetros não aceitam valores negativos, apresentando a “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.28, para valores que não se encontram de acordo com esta regra.

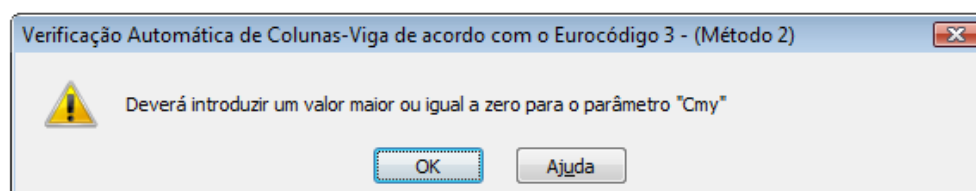


Figura 3.28 – “Caixa de mensagem” para valores negativos para os parâmetros “ C_{my} ”, “ C_{mz} ” e “ C_{mLT} ”, respectivamente

Relativamente à precisão, estes parâmetros admitem valores até à ordem das unidades, e três algarismos decimais. Caso o valor introduzido não cumpra os requisitos para o número de algarismos não decimais anteriormente referido, a ferramenta de cálculo informará o utilizador da impossibilidade de adoptar esse valor através da “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.29.

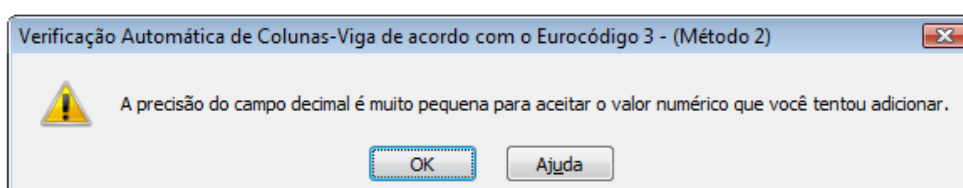


Figura 3.29 – “Caixa de mensagem” para valores que não se enquadram na ordem de grandeza estabelecida para os parâmetros “ C_{my} ”, “ C_{mz} ” e “ C_{mLT} ”

3.2.1.12 Parâmetro – “Seleccionar”

Este parâmetro tem a função de definir se o elemento deve ser sujeito a análise, e se os seus resultados devem ser revelados no item “Relatórios”. Para isso basta activar o “quadrado de selecção” como é ilustrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Selecção de elementos na ferramenta de cálculo para análise

elemento não seleccionado para análise	Seleccionar <input type="checkbox"/>
elemento seleccionado para análise	Seleccionar <input checked="" type="checkbox"/>

A vantagem deste parâmetro deve-se ao facto de permitir ao utilizador não ter obrigatoriamente que apagar outros elementos já definidos, mas cujos resultados não são necessários.

3.2.1.13 Parâmetro – “Apagar”

Este parâmetro (botão) tem a função de apagar os elementos da “folha de dados” (“Definir Peça/Estrutura”). Ao seleccionar este botão, a ferramenta de cálculo questiona se a operação deve ser concluída, através da “caixa de mensagem” ilustrada na Figura 3.30.

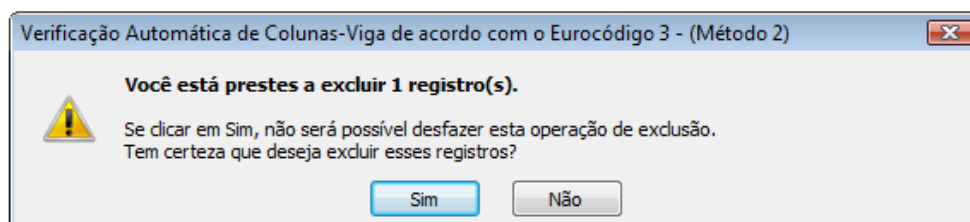


Figura 3.30 – “Caixa de mensagem” para confirmação da exclusão de um elemento da “folha de dados”

3.3 “Definir Peça/Estrutura (Modo Excel)”

Este item tem a função de fornecer uma “folha de dados” ao utilizador, com a particularidade de esta apresentar-se com uma disposição idêntica ao do programa “Microsoft Office Excel”. Esta “folha de dados” apresenta-se como um complemento da “folha de dados” que lhe dá origem (“Definir Peça/Estrutura”), e consequentemente, tem em consideração os mesmos parâmetros que a anterior.

3.3.1 Modo de funcionamento e particularidades

Neste item é fornecida uma tabela de introdução de dados, em que as linhas referem-se aos elementos individuais a serem analisados e as colunas correspondem aos diferentes parâmetros a ter em consideração na definição desses mesmos elementos.

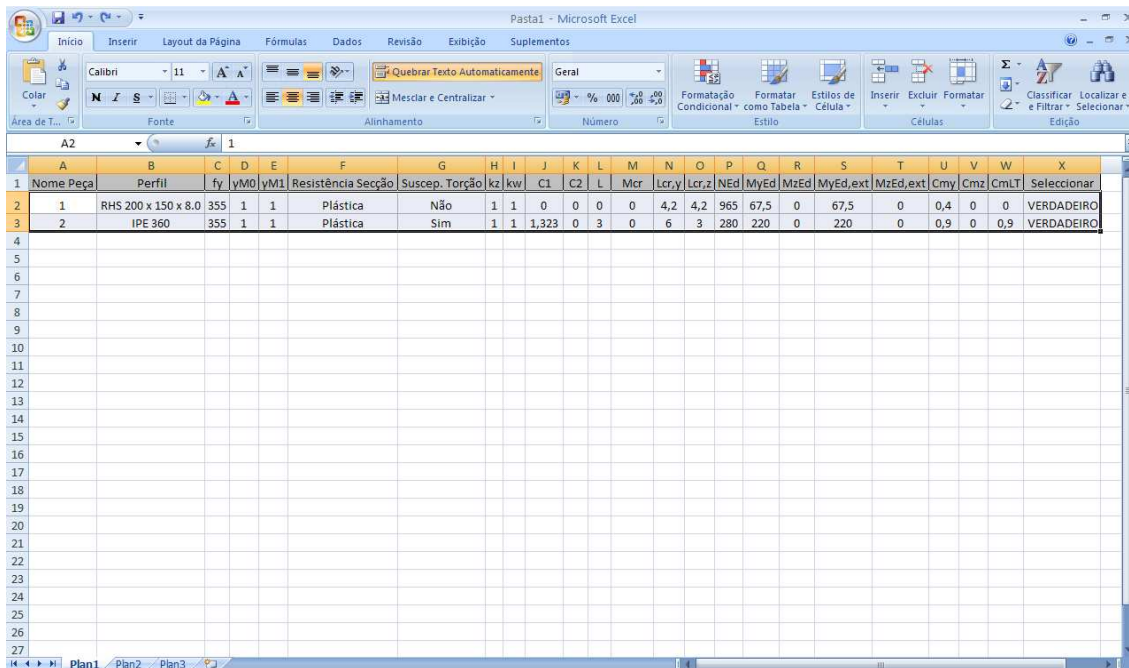
Na Figura 3.31 é apresentado o formato com que esta “folha de dados” se apresenta ao utilizador sempre que não estejam definidos quaisquer elementos.

Nome Peça	Perfil	fy	yM0	yM1	Resistência Secção	Suscep. Torção	kz	kw	C1	C2	L	Mcr	Lcr,y	Lcr,z	NEd	MyEd	MzEd	MyEd,ext	MzEd,ext	Cmy	Cmz	CmLT
HE 100 AA	HE 100 AA	235	1	1	Plástica	Sim	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3.31 – Tabela da “folha de dados” - “Definir Peça/Estrutura (Modo Excel)”

Tal como acontece na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura”, também nesta é obrigatório que o utilizador defina todas as variáveis em causa (inclusive os parâmetros nulos), para que assim a ferramenta possa proceder à sua análise. Assim, caso este procedimento não seja cumprido, uma “caixa de mensagem” dará a indicação ao utilizador de que deve digitar um valor para o parâmetro em causa.

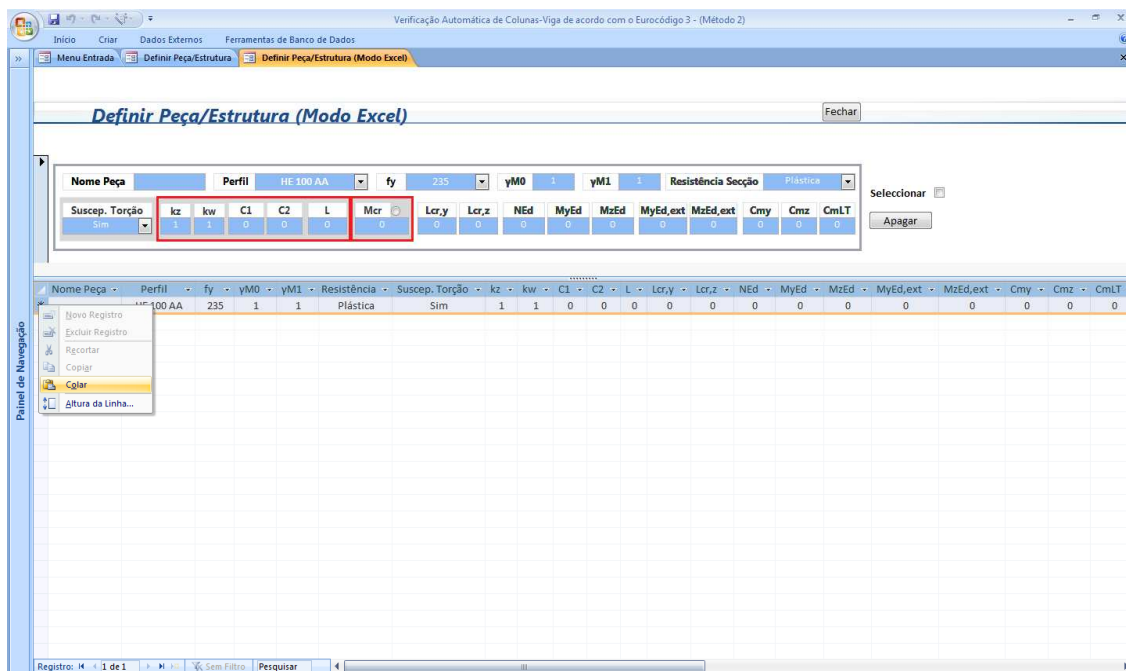
A vantagem desta “folha de dados” deve-se à possibilidade de transferir um grande número de elementos do “Microsoft Office Excel” para a ferramenta de cálculo e vice-versa, sendo o manuseamento desta tabela muito idêntico ao do programa anteriormente referido. Nas Figuras 3.32 e 3.33 ilustra-se um exemplo para demonstrar os procedimentos a ter em conta neste processo.



Nome Peça	Perfil	fy	yM0	yM1	Resistência Secção	Suscep. Torção	kz	kw	C1	C2	L	Mcr	Lcr,y	Lcr,z	NEd	MyEd	MzEd	MyEd,ext	MzEd,ext	Cmy	Cmz	CmLT	Seleccionar
1	RHS 200 x 150 x 8.0	355	1	1	Plástica	Não	1	1	0	0	0	0	4,2	4,2	965	67,5	0	67,5	0	0,4	0	0	VERDADEIRO
2	IPE 360	355	1	1	Plástica	Sim	1	1	1,323	0	3	0	6	3	280	220	0	220	0	0,9	0	0,9	VERDADEIRO

Figura 3.32 – Tabela “Microsoft Office Excel”

Como se pode verificar na Figura 3.32, a ordem dos parâmetros na tabela do “Microsoft Office Excel” é a mesma da tabela apresentada pela “folha de dados” da ferramenta de cálculo, para que os dados sejam transferidos na ordem correcta. Depois de seleccionada a tabela, recorrendo ao comando “Copiar”, o utilizador deve seleccionar a linha “em branco” para a introdução dos dados na “folha de dados” da ferramenta de cálculo através do comando “Colar”, tal como se ilustra na Figura 3.33.



Nome Peça	Perfil	fy	yM0	yM1	Resistência Secção	Suscep. Torção	kz	kw	C1	C2	L	Mcr	Lcr,y	Lcr,z	NEd	MyEd	MzEd	MyEd,ext	MzEd,ext	Cmy	Cmz	CmLT
1	HE 100 AA	235	1	1	Plástica	Sim	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3.33 - Tabela da “folha de dados” - “Definir Peça/Estrutura (Modo Excel)”

É fundamental ter em conta que os dados transferidos têm de estar de acordo com as regras de validação e com os formatos numéricos estabelecidos e já anunciados anteriormente para cada parâmetro, não sendo possível efectuar tal operação se isso não acontecer.

Não se aconselha o uso simultâneo das duas “folhas de dados” disponibilizadas pela ferramenta de cálculo (“Definir Peça/Estrutura” e “Definir Peça/Estrutura (Modo Excel)”), pelo facto da ferramenta de cálculo não actualizar os dados introduzidos simultaneamente em ambas.

3.4 Relatórios

Definido(s) e seleccionado(s) o(s) elemento(s), procede-se à verificação dos resultados da análise efectuada pela ferramenta de cálculo, através dos “Relatórios”. Este item é constituído por dois relatórios distintos, sendo eles:

- i. “Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura”
- ii. “Verificação Final”

Em seguida, dá-se a conhecer a forma como estes relatórios revelam os seus resultados e os aspectos a ter em conta na sua interpretação.

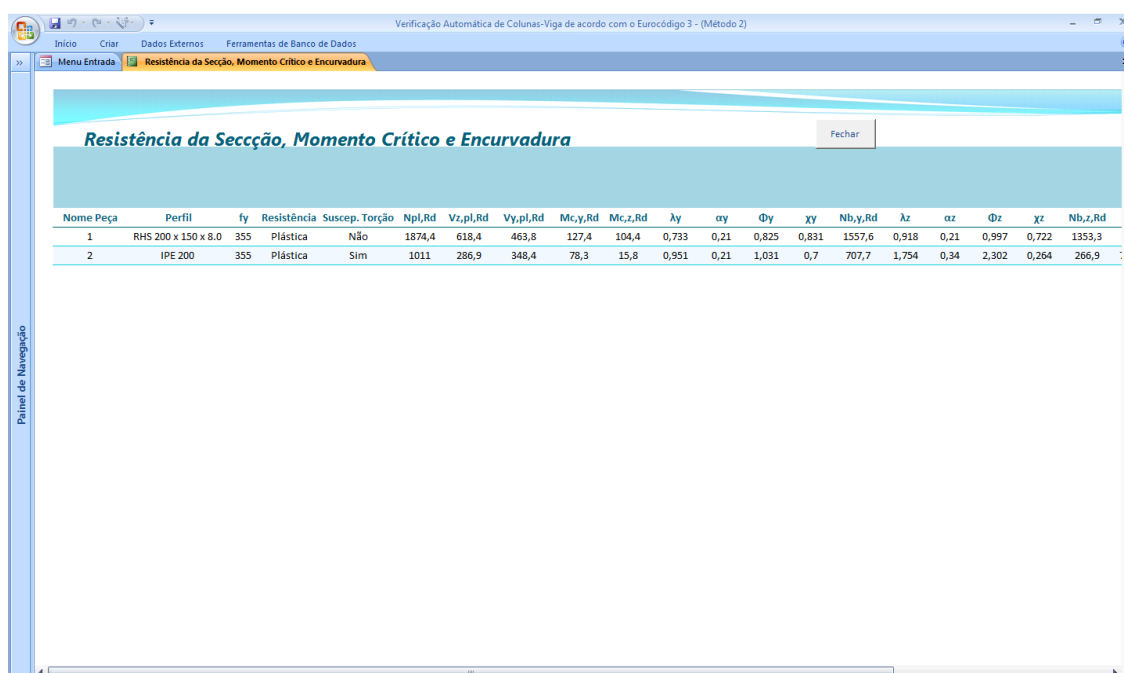
Ambos os relatórios apresentam o botão “Fechar”, para que assim o utilizador possa voltar ao “Menu Entrada”.

3.4.1 “Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura”

Este relatório tem a função de dar a conhecer (i) os esforços resistentes do elemento, (ii) o momento crítico (parâmetro que só é calculado em elementos com susceptibilidade à torção), (iii) os parâmetros da encurvadura por flexão em ambos os eixos da secção transversal dos elementos (eixo y e z) e respectiva redução do esforço axial máximo resistente ($N_{b,Rd}$), (iv) tal como os parâmetros de encurvadura lateral por flexão-torção e respectiva redução do momento flector máximo resistente segundo o eixo y da secção transversal do elemento ($M_{b,y,Rd}$).

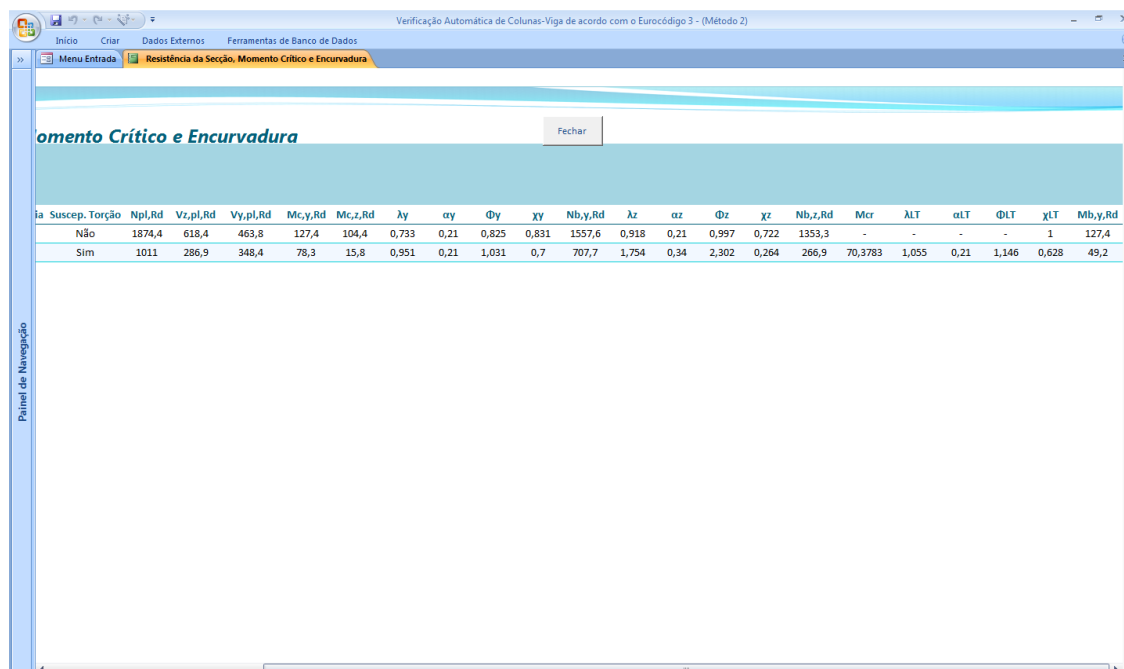
As Figuras 3.34 e 3.35 demonstram de que forma são dados a conhecer ao utilizador os resultados, dando como exemplo os resultados das análises de dois elementos (Figura 3.32).

Dada a extensão da tabela, devido ao grande número de parâmetros envolvidos nas análises dos elementos, o utilizador não poderá visualizar simultaneamente a totalidade dos resultados dessa mesma análise, tendo de recorrer ao comando “rolar a página” do relatório para a direita.



Nome Peça	Perfil	fy	Resistência	Suscep. Torção	Npl,Rd	Vz,pl,Rd	Vy,pl,Rd	Mc,y,Rd	Mc,z,Rd	λ_y	α_y	Φ_y	χ_y	Nb,y,Rd	λ_z	α_z	Φ_z	χ_z	Nb,z,Rd
1	RHS 200 x 150 x 8.0	355	Plástica	Não	1874,4	618,4	463,8	127,4	104,4	0,733	0,21	0,825	0,831	1557,6	0,918	0,21	0,997	0,722	1353,3
2	IPE 200	355	Plástica	Sim	1011	286,9	348,4	78,3	15,8	0,951	0,21	1,031	0,7	707,7	1,754	0,34	2,302	0,264	266,9

Figura 3.34 - Exemplo de Relatório “Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura” – parte 1



Nome Peça	Perfil	fy	Resistência	Suscep. Torção	Npl,Rd	Vz,pl,Rd	Vy,pl,Rd	Mc,y,Rd	Mc,z,Rd	λ_y	α_y	Φ_y	χ_y	Nb,y,Rd	λ_z	α_z	Φ_z	χ_z	Nb,z,Rd
1	RHS 200 x 150 x 8.0	355	Plástica	Não	1874,4	618,4	463,8	127,4	104,4	0,733	0,21	0,825	0,831	1557,6	0,918	0,21	0,997	0,722	1353,3
2	IPE 200	355	Plástica	Sim	1011	286,9	348,4	78,3	15,8	0,951	0,21	1,031	0,7	707,7	1,754	0,34	2,302	0,264	266,9

Figura 3.35 – Exemplo de relatório “Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura” – parte 2

Tabela 3.2 - Identificação dos parâmetros assumidos no relatório “Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura”

Parâmetro (ferramenta de cálculo)	Parâmetro (EC3)	Descrição
Nome Peça	-	Designação dada ao elemento pelo utilizador
Perfil	-	Perfil previamente seleccionado na “folha de dados”
f_y	f_y	Classe do aço previamente seleccionada na “folha de dados” que traduz o valor de cálculo da tensão de cedência do aço
Resistência	-	Tipo de análise (resistência) adoptada para o elemento
Suscep. Torção	-	Susceptibilidade à torção previamente seleccionada na “folha de dados”
$N_{pl,Rd}$	$N_{pl,Rd}$	Resistência máxima do elemento em estudo ao esforço axial
$V_{z,pl,Rd}$	$V_{z,pl,Rd}$	Resistência máxima do elemento em estudo ao esforço transversal segundo o eixo z da sua secção
$V_{y,pl,Rd}$	$V_{y,pl,Rd}$	Resistência máxima do elemento em estudo ao esforço transversal segundo o eixo y da sua secção
$M_{c,y,Rd}$	$M_{c,y,Rd}$	Resistência máxima do elemento em estudo ao momento flector segundo o eixo y da sua secção transversal, com base no tipo de resistência previamente seleccionada pelo utilizador (Plástica ou Elástica)
$M_{c,z,Rd}$	$M_{c,z,Rd}$	Resistência máxima do elemento em estudo ao momento flector segundo o eixo z da sua secção transversal, com base no tipo de resistência previamente seleccionada pelo utilizador (Plástica ou Elástica)
λ_y	$\bar{\lambda}_y$	Esbelteza normalizada para a instabilidade por flexão do elemento em torno do eixo y da sua secção transversal
α_y	α_y	Parâmetro de imperfeição para a instabilidade por flexão simples do elemento em torno do eixo y da sua secção transversal
Φ_y	Φ_y	-
χ_y	χ_y	Factor de redução para a instabilidade por flexão do elemento em torno do eixo y da sua secção transversal
$N_{b,y,Rd}$	$N_{b,y,Rd}$	Esforço axial resistente à encurvadura por flexão simples do elemento em torno do eixo y da sua secção transversal
λ_z	$\bar{\lambda}_z$	Esbelteza normalizada para a instabilidade por flexão do elemento em torno do eixo z da sua secção transversal
α_z	α_z	Parâmetro de imperfeição para a instabilidade por flexão do elemento em torno do eixo z da sua secção transversal
Φ_z	Φ_z	-
χ_z	χ_z	Factor de redução para a instabilidade por flexão do elemento em torno do eixo z da sua secção transversal
$N_{b,z,Rd}$	$N_{b,z,Rd}$	Esforço axial resistente à encurvadura por flexão do elemento em torno do eixo z da sua secção transversal
M_{cr}	M_{cr}	Momento crítico do elemento
λ_{LT}	$\bar{\lambda}_{LT}$	Esbelteza normalizada para a instabilidade lateral por flexão-torção do elemento
α_{LT}	α_{LT}	Parâmetro de imperfeição para a instabilidade lateral por flexão-torção do elemento
Φ_{LT}	Φ_{LT}	-
χ_{LT}	χ_{LT}	Factor de redução para a instabilidade lateral por flexão-torção do elemento
$M_{b,y,Rd}$	$M_{b,y,Rd}$	Momento resistente à encurvadura lateral por flexão-torção do elemento

A Tabela 3.2 faz a identificação dos parâmetros intervenientes no relatório, e devido à impossibilidade de apresentar estes parâmetros com a mesma terminologia que o EC3, é apresentada a respectiva correspondência entre eles.

Quando for assumido para um elemento em análise que este não é susceptível à encurvadura lateral por flexão-torção, o relatório não apresentará qualquer valor para os parâmetros (i) “Mcr”, (ii) “ λ_{LT} ”, (iii) “ α_{LT} ” e (iv) “ Φ_{LT} ”, indicando a não consideração destes parâmetros neste tipo de análise. Quanto ao parâmetro “ χ_{LT} ”, assumirá o valor da unidade (1), dado não se verificar a redução do momento flector resistente.

3.4.1.1 Factores a ter em conta

Para uma utilização correcta da ferramenta de cálculo, quando previamente seleccionada a opção “Sim” na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura” para o parâmetro “Suscep. Torção” (elemento susceptível à instabilidade lateral por flexão-torção), o utilizador deve ter em consideração dois factores:

- (i) não definir perfis tubulares para estes elementos;
- (ii) na definição de perfis I ou H o utilizador tem obrigatoriamente que definir valores para os parâmetros “C1” (factor de forma do momento) e “L” (comprimento do elemento entre contraventamentos), ou para o parâmetro “Mcr” (momento crítico).

Quando o utilizador não tem em conta estes dois factores, é de prever que a ferramenta de cálculo apresente neste relatório o resultado “#Erro” para os parâmetros relacionados com a susceptibilidade do elemento à torção (“Mcr”, “ λ_{LT} ”, “ α_{LT} ”, “ Φ_{LT} ” e “ χ_{LT} ”). As Figuras 3.36 e 3.37 ilustram exemplos desses dois factores, através das peças de nome “1” e “2” para o primeiro e segundo caso respectivamente.

Nome Peça	Perfil	fy	Resistência	Suscep. Torção	Npl,Rd	Vz,pl,Rd	Vy,pl,Rd	Mc,y,Rd	Mc,z,Rd	λ_y	α_y	Φ_y	χ_y	Nb,y,Rd	λ_z	α_z	Φ_z	χ_z	Nb,z,Rd
1	RHS 200 x 150 x 8.0	355	Plástica	Sim	1874,4	618,4	463,8	127,4	104,4	0,733	0,21	0,825	0,831	1557,6	0,918	0,21	0,997	0,722	1353,3
2	IPE 200	355	Plástica	Sim	1011	286,9	348,4	78,3	15,8	0,951	0,21	1,031	0,7	707,7	1,754	0,34	2,302	0,264	266,9

Figura 3.36 – Exemplo de relatório “Resistência da Seção, Momento Crítico e Encurvadura” (Factores a ter em conta) – parte 1

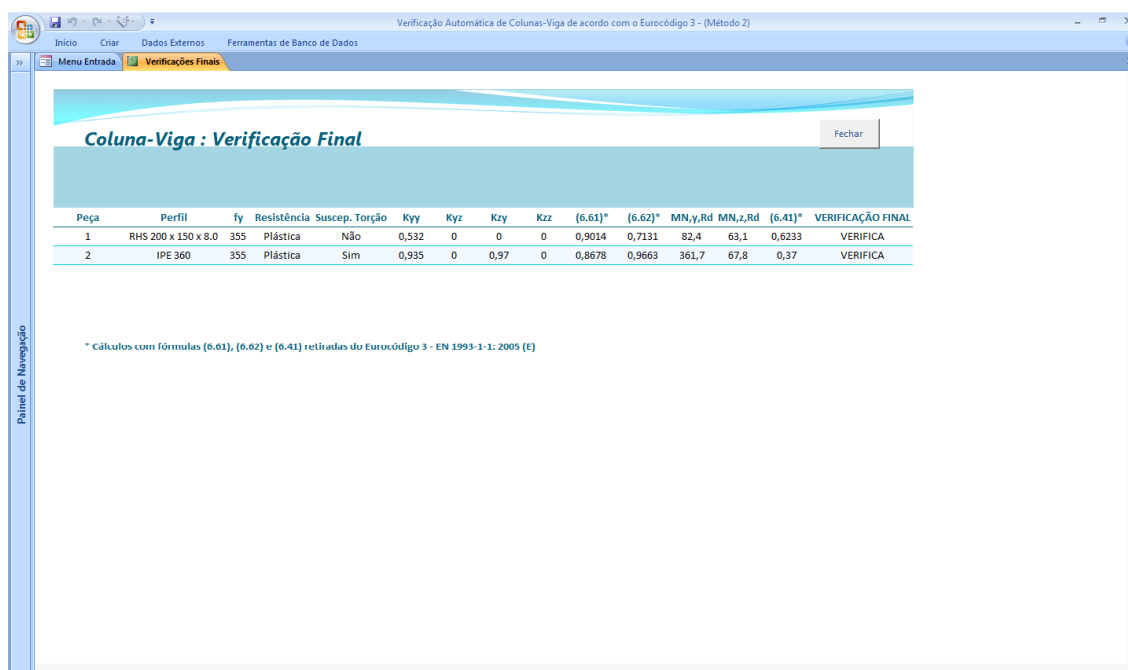
Suscep. Torção	Npl,Rd	Vz,pl,Rd	Vy,pl,Rd	Mc,y,Rd	Mc,z,Rd	λ_y	α_y	Φ_y	χ_y	Nb,y,Rd	λ_z	α_z	Φ_z	χ_z	Nb,z,Rd	Mcr	λ_{LT}	α_{LT}	Φ_{LT}	χ_{LT}	Nb,y,Rd
Sim	1874,4	618,4	463,8	127,4	104,4	0,733	0,21	0,825	0,831	1557,6	0,918	0,21	0,997	0,722	1353,3	#Erro	#Erro	0,21	#Erro	#Erro	#Erro
Sim	1011	286,9	348,4	78,3	15,8	0,951	0,21	1,031	0,7	707,7	1,754	0,34	2,302	0,264	266,9	#Erro	#Erro	0,21	#Erro	#Erro	#Erro

Figura 3.37 – Exemplo de relatório “Resistência da Seção, Momento Crítico e Encurvadura” (Factores a ter em conta) – parte 2

3.4.2 “Verificação Final”

Este relatório tem a função de dar a conhecer as verificações dos elementos à encurvadura segundo o EC3 (ver secção 3.5.3), tal como verificar as secções de extremidade do elemento (ver secção 3.5.3.1). A ferramenta de cálculo só procede à verificação das secções de extremidade do elemento para secções transversais de classe 1 e 2 (resistência plástica), descurando a sua verificação para elementos que adoptem a resistência elástica para a sua análise.

A Figura 3.38 ilustra de que forma são dados a conhecer os resultados ao utilizador, dando como exemplo os resultados das análises dos dois elementos referidos no relatório “Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura”.



Coluna-Viga : Verificação Final

Peca	Perfil	fy	Resistência	Suscep. Torção	Kyy	Kyz	Kzy	Kzz	(6.61)*	(6.62)*	MN _{y,Rd}	MN _{z,Rd}	(6.41)*	VERIFICAÇÃO FINAL
1	RHS 200 x 150 x 8.0	355	Plástica	Não	0,532	0	0	0	0,9014	0,7131	82,4	63,1	0,6233	VERIFICA
2	IPE 360	355	Plástica	Sim	0,935	0	0,97	0	0,8678	0,9663	361,7	67,8	0,37	VERIFICA

* Cálculos com fórmulas (6.61), (6.62) e (6.41) retiradas do Eurocódigo 3 - EN 1993-1-1: 2005 (E)

Figura 3.38 – Exemplo 1 de relatório “Verificação Final”

Tabela 3.3 - Identificação dos parâmetros assumidos no relatório “Verificação Final”

Parâmetro (ferramenta de cálculo)	Parâmetro (EC3)	Descrição
Nome Peça	-	Designação dada ao elemento pelo utilizador
Perfil	-	Perfil previamente seleccionado na “folha de dados”
f_y	f_y	Classe do aço previamente seleccionada na “folha de dados” que traduz o valor de cálculo da tensão de cedência do aço
Resistência	-	Tipo de análise (resistência) adoptada para o elemento
Suscep. Torção	-	Susceptibilidade à torção previamente seleccionada na “folha de dados”
k_{yy}	k_{yy}	Coefficiente de interacção segundo y quando o momento flector actua segundo y
k_{yz}	k_{yz}	Coefficiente de interacção segundo y quando o momento flector actua segundo z
k_{zy}	k_{zy}	Coefficiente de interacção segundo z quando o momento flector actua segundo y
k_{zz}	k_{zz}	Coefficiente de interacção segundo z quando o momento flector actua segundo z
(6.61)	-	Fórmula retirada do EC3
(6.62)	-	Fórmula retirada do EC3
$M_{N,y,Rd}$	$M_{N,y,Rd}$	Momento plástico reduzido pela presença do esforço axial segundo y
$M_{N,z,Rd}$	$M_{N,z,Rd}$	Momento plástico reduzido pela presença do esforço axial segundo z
(6.41)	-	Fórmula retirada do EC3
VERIFICAÇÃO FINAL	-	Verificação da segurança do elemento relativamente às fórmulas (6.61), (6.62) e (6.41)

A Tabela 3.3 faz a identificação dos parâmetros intervenientes, e devido à impossibilidade de apresentar estes parâmetros com a mesma terminologia do EC3, é apresentada a respectiva correspondência entre eles.

Tal como se pode verificar nas Figuras 3.38, 3.29 e 3.40, o parâmetro “VERIFICAÇÃO FINAL” apresenta unicamente os resultados “Verifica” e “Não Verifica”, tendo em conta os resultados das fórmulas 6.61, 6.62 e 6.41 do EC3 (ver secções 3.5.3 e 3.5.3.1). Assim, este parâmetro tem como objectivo dar a conclusão final da ferramenta de cálculo relativamente à análise do elemento à sua segurança.

As Figuras 3.39 e 3.40 ilustram exemplos de elementos que não verificam a segurança por parte da análise efectuada pela ferramenta de cálculo. Sempre que isso acontecer, os parâmetros “Nome Peça” e “VERIFICAÇÃO FINAL” deste relatório apresentam os seus resultados em “fundo vermelho”, como forma de alertar o utilizador destes resultados. Relativamente à equação que não for verificada, os seus resultados serão revelados “a vermelho”. Por fim, se o elemento não verificar a sua segurança relativamente às equações de interacção para a verificação à encurvadura (fórmulas 6.61 e 6.62 do EC3), a ferramenta não procede à verificação da segurança das secções de extremidade do elemento (fórmula 6.41 do EC3), tal como ilustra a Figura 3.40.

Peça	Perfil	f _y	Resistência	Suscep. Torção	K _{yy}	K _{yz}	K _{zy}	K _{zz}	(6.61)*	(6.62)*	MN _{y,Rd}	MN _{z,Rd}	(6.41)*	VERIFICAÇÃO FINAL
1	RHS 200 x 150 x 8.0	355	Plástica	Não	0,532	0	0	0	0,9014	0,7131	82,4	63,1	1,0029	NÃO VERIFICA

* Cálculos com fórmulas (6.61), (6.62) e (6.41) retiradas do Eurocódigo 3 - EN 1993-1-1: 2005 [E]

Figura 3.39 – Exemplo 2 de relatório “Verificação Final”

Peça	Perfil	f _y	Resistência	Suscep. Torção	K _{yy}	K _{yz}	K _{zy}	K _{zz}	(6.61)*	(6.62)*	MN _{y,Rd}	MN _{z,Rd}	(6.41)*	VERIFICAÇÃO FINAL
1	RHS 200 x 150 x 8.0	355	Plástica	Não	0,532	0	0,3192	0	1,0371	0,9636	X	X	X	NÃO VERIFICA

* Cálculos com fórmulas (6.61), (6.62) e (6.41) retiradas do Eurocódigo 3 - EN 1993-1-1: 2005 [E]

Figura 3.40 - Exemplo 3 de relatório “Verificação Final”

3.4.2.1 Factores a ter em conta

Como já anunciado para o relatório anterior, para uma utilização correcta da ferramenta de cálculo, e consequentemente deste relatório, o utilizador deve ter em conta os dois factores anteriormente anunciados no caso de no parâmetro “Suscep. Torção” for seleccionada a opção “Sim” (elemento susceptível a instabilidade lateral por flexão-torção) na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura” (ver secção 4.4.1.1). Ao contrário do relatório “Resistência da Secção, Momento Crítico e Encurvadura” que alerta o utilizador para estas incompatibilidades, neste relatório o utilizador ao seleccionar o botão correspondente no “Menu Entrada” que lhe dá acesso, verá aparecer a “caixa de mensagem” ilustrada pela Figura 3.41, impossibilitando deste modo o acesso ao relatório.

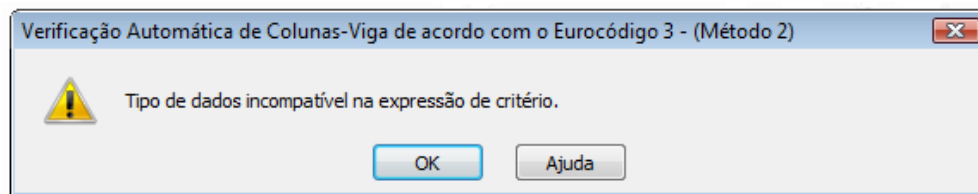


Figura 3.41 – “Caixa de mensagem” para dados incompatíveis para o relatório “Verificação Final”

4 EXEMPLOS DE VALIDAÇÃO

Este capítulo tem o objectivo de validar e analisar a ferramenta de cálculo elaborada para este trabalho, procedendo a sua aplicação a problemas extraídos de Boissonnade *et al.*, 2006 – pág. 172-191 e das aulas da disciplina de Estruturas Metálicas e Mistas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (F.C.T. - U.N.L.). Ao todo serão analisados quatro problemas de elementos individuais (barras) com diferentes tipos de perfis, carregamentos e contraventamentos e, finalmente, um pórtico plano.

É importante ter em conta que, nos problemas 1 e 2, os valores geométricos do perfil *RHS 200x100x10* não coincidem com os valores tabelados e considerados pela ferramenta de cálculo. Assim, foram adoptados para a resolução do exercício os mesmos valores geométricos dos adoptados pela ferramenta de cálculo, permitindo deste modo fazer a validação destes exemplos.

4.1 Problema 1

Neste problema é abordada uma coluna-viga simplesmente apoiada, submetida a esforço axial de compressão e a uma carga distribuída, que produz momento flector segundo o eixo *y* da sua secção transversal, tal como está representado na Figura 4.1.

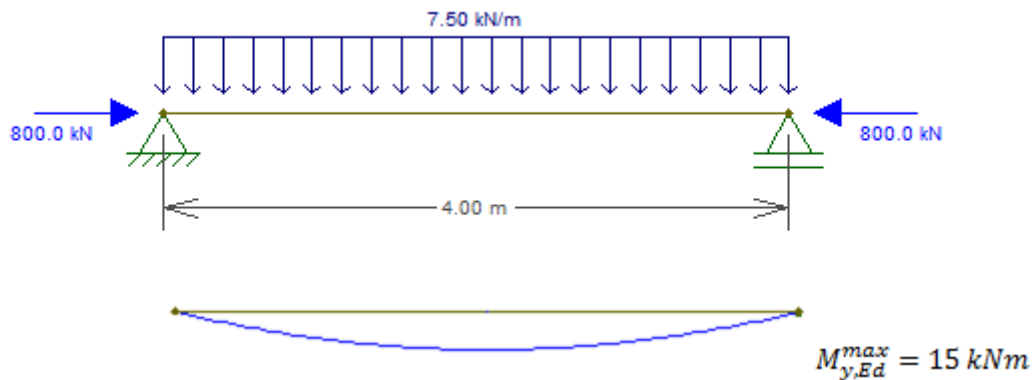


Figura 4.1 - Coluna-viga com perfil *RHS 200x100x10*

O perfil adoptado para o elemento é um *RHS 200x100x10*, não se verificando assim instabilidade lateral por flexão-torção. A tensão de cedência do aço será de $f_y = 235 \text{ MPa}$. As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam as características do perfil adoptado neste problema, as propriedades do material (aço) e valores dos esforços.

Tabela 4.1 - Características do perfil adoptado RHS 200x100x10

Comprimento de encurvadura por flexão	$L = 4,0 \text{ m}$	
Dimensões da alma e do banzo	$b_f = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$ $t_f = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$	$h_w = 180 \text{ mm} = 0,18 \text{ m}$ $t_w = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$
Área da secção transversal	$A = 54,9 \text{ cm}^2 = 5,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$	
Inércia	$I_y = 2664 \text{ cm}^4 = 26,64 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$ $I_z = 869 \text{ cm}^4 = 8,69 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$	
Módulo de flexão plástico	$W_{pl,y} = 341 \text{ cm}^3 = 341 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ $W_{pl,z} = 206 \text{ cm}^3 = 206 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	
Módulo de flexão elástico	$W_{el,y} = 266 \text{ cm}^3 = 266 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ $W_{el,z} = 174 \text{ cm}^3 = 174 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	
Raio de giração	$i_y = 6,96 \text{ cm} = 69,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $i_z = 3,98 \text{ cm} = 39,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	
Rigidez de torção (Saint-Venant)	$I_t = 2156 \text{ m}^4 = 2156 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4$	

Tabela 4.2 - Propriedades do material (aço)

Módulos de elasticidade e de distorção	$E = 210000 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$ $G = 80770 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
Tensão de cedência do aço	$f_y = 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
Coeficientes parciais de segurança	$\gamma_{M0} = 1,0$ $\gamma_{M1} = 1,0$

Tabela 4.3 - Esforços internos da coluna-viga

Esforços de compressão	$N_{Ed} = 800 \text{ kN}$
Momento flector máximo no eixo y (a meio vão)	$M_{y,Ed} = 15 \text{ kNm}$
Momento flector máximo no eixo z	$M_{z,Ed} = 0 \text{ kNm}$

4.1.1 Classificação da secção transversal

- i. Alma em compressão:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2t - 2r}{t} = \frac{200 \cdot 10^{-3} \text{ m} - 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ m} - 2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{10 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 14,0 \leq 33 \varepsilon$$

$$\text{Classe 1 com limite: } 33 \varepsilon = 33 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 33$$

⇒ A alma em compressão é de classe 1.

- ii. Banzo em compressão:

$$\frac{c}{t} = \frac{b - 2t - 2r}{t} = \frac{100 \cdot 10^{-3} m - 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} m - 2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} m}{10 \cdot 10^{-3} m} = 4,0 \leq 33 \varepsilon$$

$$\text{Classe 1 com limite: } 33 \varepsilon = 33 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 33$$

⇒ O banzo em compressão é de classe 1.

⇒ Logo a secção transversal é de classe 1, i.e., a resistência da secção é plástica.

4.1.2 Verificações da segurança do elemento analiticamente

i. Factores de redução para a encurvadura:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{210000 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2}{235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2}} = 93,9$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr}}{i_y} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4 \text{ m}}{69,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \frac{1}{93,9} = 0,612$$

Parâmetro de imperfeição para encurvadura no eixo y da secção transversal: $\alpha_y = 0,21$

$$\Phi_y = 0,5 \left[1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21(0,612 - 0,2) + 0,612^2] = 0,731$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + (\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2)^{1/2}} = \frac{1}{0,731 + (0,731^2 - 0,612^2)^{1/2}} = 0,884 \leq 1$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_z} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4 \text{ m}}{39,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \frac{1}{93,9} = 1,070$$

Parâmetro de imperfeição para encurvadura no eixo z da secção transversal: $\alpha_z = 0,21$

$$\Phi_z = 0,5 \left[1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21(1,070 - 0,2) + 1,070^2] = 1,164$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + (\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2)^{1/2}} = \frac{1}{1,164 + (1,164^2 - 1,070^2)^{1/2}} = 0,616 \leq 1$$

ii. Factor de momento equivalente:

$$\psi_y = \frac{M_{y,Ed \text{ extremidade direita}}}{M_{y,Ed \text{ extremidade esquerda}}} = 0$$

$$M_s = M_{y,Ed \text{ meio vão}} = 15 \text{ kNm}$$

$$M_h = 0$$

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = \frac{0}{15 \text{ kNm}} = 0$$

$$C_{my} = 0,95 + 0,05 \cdot \alpha_h = 0,95 + 0,05 \cdot 0 = 0,95$$

iii. Factores de interacção:

$$N_{pl,Rk} = A \cdot f_y = 5,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 = 1290,2 \text{ kN}$$

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{pl,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{800 \text{ kN}}{0,884 \frac{1290,2 \text{ kN}}{1,0}} = 0,70$$

$$\bar{\lambda}_y < 1 : k_{yy} = C_{my} [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2)n_y] = 0,95 [1 + (0,612 - 0,2)0,701] = 1,224$$

$$k_{zy} = 0$$

Apesar de na resolução do problema poder ser considerado $k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy}$, a ferramenta de cálculo admite sempre $k_{zy} = 0$ quando o elemento não é susceptível à deformação por torção.

iv. Verificação

$$M_{pl,y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 341 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 = 80,1 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{800 \text{ kN}}{0,884 \frac{1290,2 \text{ kN}}{1,0}} + 1,224 \frac{15 \text{ kNm}}{1,0 \frac{80,1 \text{ kNm}}{1,0}} = 0,931 \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{800 \text{ kN}}{0,616 \frac{1290,2 \text{ kN}}{1,0}} + 0 \cdot \frac{15 \text{ kNm}}{1,0 \frac{80,1 \text{ kNm}}{1,0}} = 1,007 \geq 1$$

⇒ A coluna-viga não verifica a segurança.

4.1.3 Verificações da segurança do elemento recorrendo à ferramenta de cálculo

Começa-se pela introdução dos dados do problema na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura” como forma de definir o elemento a ser analisado, tal como se pode ver na Figura 4.2.

Nome Peça	Problema 1	Perfil	RHS 200 x 100 x 10.0	fy	235	yM0	1	yM1	1	Resistência Secção	Plástica	Seleccionar <input checked="" type="checkbox"/> Apagar	
Suscep. Torção	Não	kz	1	kw	1	C1	0	C2	0	L	0		Mcr
		Lcr,y	4	Lcr,z	4	NEd	800	MyEd	15	MzEd	0	MyEd_ext	0
										MzEd_ext	0	Cmy	0.95
												Cmz	0
												CmLT	0

Figura 4.2 - Dados do problema 1 na folha de dados – “Definir Peça/Estrutura”

Definidos os dados do problema, em seguida basta verificar os resultados da sua análise na secção “Relatórios”, sendo os seus resultados apresentados nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

Npl,Rd	Vz,pl,Rd	Vy,pl,Rd	Mc,y,Rd	Mc,z,Rd
1290,2	496,6	248,3	80,1	48,4

Figura 4.3 – Esforços internos máximos resistentes

λ_y	α_y	Φ_y	χ_y	Nb,y,Rd	λ_z	α_z	Φ_z	χ_z	Nb,z,Rd
0,612	0,21	0,731	0,884	1140,5	1,071	0,21	1,165	0,616	794,7

Figura 4.4 – Parâmetros da encurvadura por flexão

Mcr	λ_{LT}	α_{LT}	Φ_{LT}	χ_{LT}	Mb,y,Rd
-	-	-	-	1	80,1

Figura 4.5 – Parâmetros da encurvadura lateral por flexão-torção

Kyy	Kyz	Kzy	Kzz	(6.61)*	(6.62)*	MN,y,Rd	MN,z,Rd	(6.41)*	VERIFICAÇÃO FINAL
1,225	0	0	0	0,9308	1,0066	X	X	X	NÃO VERIFICA

Figura 4.6 – Coeficientes de interacção e verificações

Como é possível averiguar, também nesta análise realizada pela ferramenta de cálculo, o elemento não verifica a segurança. Conclui-se que os resultados obtidos pela ferramenta de cálculo são praticamente idênticos aos da resolução manual do exercício. As pequenas diferenças em alguns parâmetros devem-se apenas a arredondamentos.

4.2 Problema 2

Neste problema é abordada uma coluna-viga simplesmente apoiada, submetida a esforço axial de compressão e a momento flector em ambos os eixos da sua secção transversal, tal como se pode verificar pela Figura 4.7.

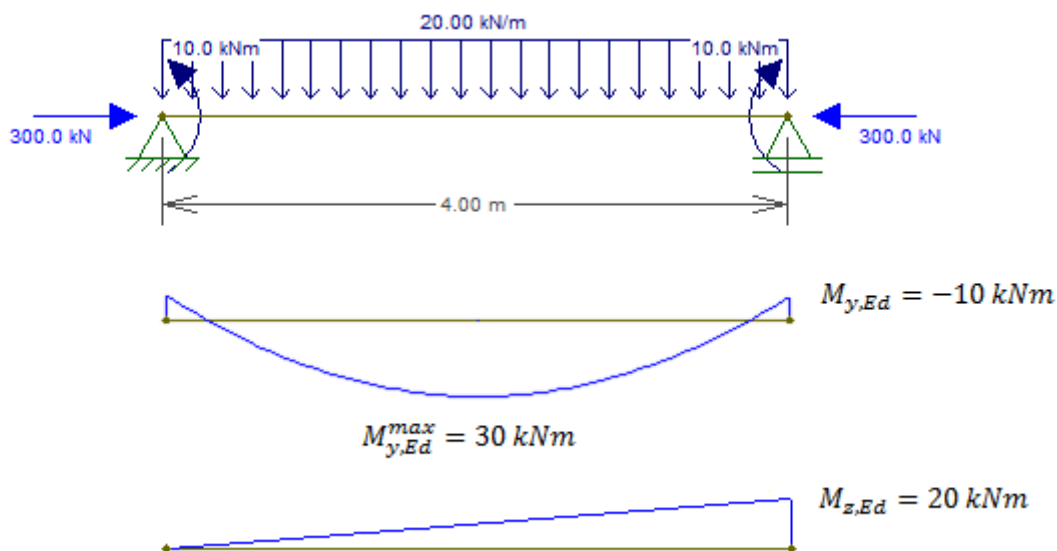


Figura 4.7 - Colua-viga com perfil RHS 200x100x10

O perfil adoptado para este elemento é um *RHS 200x100x10*, não existindo por isso instabilidade lateral por flexão-torção. A tensão de cedência do aço é $f_y = 235 \text{ MPa}$. As Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam as características do perfil adoptado neste problema, as propriedades do material (aço) e valores dos esforços.

Tabela 4.4 - Características do perfil adoptado RHS 200x100x10

Comprimento de encurvadura por flexão	$L = 4,0 \text{ m}$	
Dimensões da alma e do banzo	$b_f = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$	$h_w = 180 \text{ mm} = 0,18 \text{ m}$
	$t_f = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$	$t_w = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$
Área da secção transversal	$A = 54,9 \text{ cm}^2 = 5,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$	
Inércia	$I_y = 2664 \text{ cm}^4 = 26,64 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$	
	$I_z = 869 \text{ cm}^4 = 8,69 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$	
Módulo de flexão plástico	$W_{pl,y} = 341 \text{ cm}^3 = 341 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	
	$W_{pl,z} = 206 \text{ cm}^3 = 206 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	
Módulo de flexão elástico	$W_{el,y} = 266 \text{ cm}^3 = 266 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	
	$W_{el,z} = 174 \text{ cm}^3 = 174 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	
Raio de giração	$i_y = 6,96 \text{ cm} = 69,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	
	$i_z = 3,98 \text{ cm} = 39,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	
Rigidez de torção (Saint-Venant)	$I_t = 2156 \text{ m}^4 = 2156 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4$	

Tabela 4.5 - Propriedades do material (aço)

Módulos de elasticidade e de distorção	$E = 210000.10^3 \text{ kN/m}^2$ $G = 80770.10^3 \text{ kN/m}^2$
Tensão de cedência do aço	$f_y = 235.10^3 \text{ kN/m}^2$
Coeficientes parciais de segurança	$\gamma_{M0} = 1,0$ $\gamma_{M1} = 1,0$

Tabela 4.6 - Esforços internos da coluna-viga

Esforços de compressão	$N_{Ed} = 300 \text{ kNm}$
Momento flector máximo no eixo y (a meio vão e nas extremidades)	$M_{y,Ed,meio \text{ vão}} = 30 \text{ kNm}$ $M_{y,Ed,extremidade} = 10 \text{ kNm}$
Momento flector máximo no eixo z (na extremidade direita)	$M_{z,Ed} = 20 \text{ kNm}$

4.2.1 Classificação da secção transversal

- i. Alma em compressão:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2t - 2r}{t} = \frac{200.10^{-3}\text{m} - 2.10.10^{-3}\text{m} - 2.20.10^{-3}\text{m}}{10.10^{-3}\text{m}} = 14,0 \leq 33 \varepsilon$$

Classe 1 com limite: $33 \varepsilon = 33 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 33$

⇒ A alma em compressão é de classe 1.

- ii. Banzo em compressão:

$$\frac{c}{t} = \frac{b - 2t - 2r}{t} = \frac{100.10^{-3}\text{m} - 2.10.10^{-3}\text{m} - 2.20.10^{-3}\text{m}}{10.10^{-3}\text{m}} = 4,0 \leq 33 \varepsilon$$

Classe 1 com limite: $33 \varepsilon = 33 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 33$

⇒ O banzo em compressão é de classe 1.

⇒ Logo a secção transversal é de classe 1, i.e., a resistência é plástica.

4.2.2 Verificações da segurança do elemento analiticamente

i. Factores de redução para a encurvadura:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{210000 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2}{235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2}} = 93,9$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr}}{i_y} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4 \text{ m}}{69,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \frac{1}{93,9} = 0,612$$

Parâmetro de imperfeição para encurvadura no eixo y da secção transversal: $\alpha_y = 0,21$

$$\Phi_y = 0,5 \left[1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21(0,612 - 0,2) + 0,612^2] = 0,731$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + (\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2)^{1/2}} = \frac{1}{0,731 + (0,731^2 - 0,612^2)^{1/2}} = 0,884 \leq 1$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_z} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4 \text{ m}}{39,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \frac{1}{93,9} = 1,070$$

Parâmetro de imperfeição para encurvadura no eixo z da secção transversal: $\alpha_z = 0,21$

$$\Phi_z = 0,5 \left[1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21(1,070 - 0,2) + 1,070^2] = 1,164$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + (\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2)^{1/2}} = \frac{1}{1,164 + (1,164^2 - 1,070^2)^{1/2}} = 0,616 \leq 1$$

ii. Factor de momento equivalente:

$$\psi_y = \frac{M_{y,Ed,extremidade \text{ direita}}}{M_{y,Ed,extremidade \text{ esquerda}}} = \frac{-10 \text{ kNm}}{-10 \text{ kNm}} = 1$$

$$M_s = M_{y,Ed \text{ meio vão}} = 30 \text{ kNm}$$

$$M_h = -10 \text{ kNm}$$

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = \frac{-10 \text{ kNm}}{30 \text{ kNm}} = -0,33$$

$$c_{my} = 0,95 + 0,05 \cdot \alpha_h = 0,95 + 0,05 \cdot (-0,33) = 0,933$$

$$\psi_z = \frac{M_{z,Ed,extremidade \text{ direita}}}{M_{z,Ed,extremidade \text{ esquerda}}} = \frac{0}{20 \text{ kNm}} = 0$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi_z = 0,6 + 0,4 \cdot 0 = 0,6 \geq 0,4$$

iii. Factores de interacção:

$$N_{pl,Rk} = A \cdot f_y = 5,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 235 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 1290,2 \text{ kN}$$

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{c,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{300 \text{ kN}}{0,884 \frac{1290,2 \text{ kN}}{1,0}} = 0,263$$

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{c,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{300 \text{ kN}}{0,616 \frac{1290,2 \text{ kN}}{1,0}} = 0,378$$

$$\bar{\lambda}_y < 1 : k_{yy} = C_{my} [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2)n_y] = 0,933 [1 + (0,612 - 0,2)0,263] = 1,034$$

$$\bar{\lambda}_z > 1 : k_{zz} = C_{mz} [1 + 0,8n_y] = 0,600 [1 + (0,8 \cdot 0,378)] = 0,781$$

i. Verificação

$$M_{pl,y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 341 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 = 80,1 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y = 206 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 = 48,4 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + 0,6 \cdot k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} &= \\ &= \frac{300 \text{ kN}}{0,884 \frac{1290,2 \text{ kN}}{1,0}} + 1,034 \frac{30 \text{ kNm}}{1,0 \frac{80,1 \text{ kNm}}{1,0}} + 0,6 \cdot 0,781 \frac{20 \text{ kNm}}{48,4 \frac{\text{kNm}}{1,0}} = 0,843 \leq 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + 0,6 \cdot k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} &= \\ &= \frac{300 \text{ kN}}{0,616 \frac{1290,2 \text{ kN}}{1,0}} + 0,6 \cdot 1,034 \cdot \frac{30 \text{ kNm}}{1,0 \frac{80,2 \text{ kNm}}{1,0}} + 0,781 \cdot \frac{20 \text{ kNm}}{48,4 \frac{\text{kNm}}{1,0}} = 0,932 \leq 1 \end{aligned}$$

⇒ A coluna-viga verifica a segurança

Em seguida procede-se à verificação das secções de extremidade do elemento, onde se começa por verificar se é necessário ter em conta a redução do momento flector resistente plástico.

$$n = \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{c,Rk}}{\gamma_{M0}}} = \frac{300 \text{ kN}}{\frac{1290,2 \text{ kN}}{1,0}} = 0,233 \leq 0,25$$

$$n_w = \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{h_w \cdot t_w \cdot f_y} = \frac{300 \text{ kN} \cdot 1,0}{0,180 \text{ m} \cdot 0,01 \text{ m} \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}} = 0,709 \geq 0,5$$

Assim, terá de proceder-se à verificação dos momentos de extremidade do elemento. Apenas os momentos da extremidade direita do elemento necessitam de ser verificados, pois é nesta extremidade que se verificam maiores valores de momento flector, e os restantes esforços são iguais aos da outra extremidade.

$$a_w = \frac{(A - 2 \cdot b \cdot t)}{A} = \frac{(5,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 - 2 \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 0,01 \text{ m})}{5,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 0,636 \geq 0,5, \text{ logo } a_w = 0,5$$

$$a_f = \frac{(A - 2 \cdot h_w \cdot t)}{A} = \frac{(5,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 - 2 \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 0,01 \text{ m})}{5,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 0,271 \leq 0,5$$

$$M_{N,pl,y,Rd} = \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a_w} \frac{M_{pl,y,Rk}}{\gamma_{m0}} = \frac{1-0,233}{1-0,5 \cdot 0,5} \frac{80,2 \text{ kNm}}{1,0} = 83,1 \text{ kNm} \geq \frac{M_{pl,y,Rk}}{\gamma_{m0}} = \frac{80,1 \text{ kNm}}{1,0} = 80,1 \text{ kNm}$$

$$M_{N,pl,z,Rd} = \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a_f} \frac{M_{pl,z,Rk}}{\gamma_{m0}} = \frac{1-0,233}{1-0,5 \cdot 0,271} \frac{48,4 \text{ kNm}}{1,0} = 42,9 \text{ kNm} \leq \frac{M_{pl,z,Rk}}{\gamma_{m0}} = \frac{48,4 \text{ kNm}}{1,0} = 48,4 \text{ kNm}$$

$$\alpha = \beta = \frac{1,66}{1 - 1,13 \cdot n^2} = \frac{1,66}{1 - 1,13 \cdot 0,233^2} = 1,768 \leq 6$$

$$\left[\frac{M_{y,Ed,extremidade \text{ direita}}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed,extremidade \text{ direita}}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta =$$

$$= \left[\frac{10 \text{ kNm}}{80,1 \text{ kNm}} \right]^{1,768} + \left[\frac{20 \text{ kNm}}{42,9 \text{ kNm}} \right]^{1,768} = 0,285 \leq 1$$

⇒ As secções de extremidade verificam a segurança.

4.2.3 Verificações da segurança do elemento recorrendo à ferramenta de cálculo

Começa-se pela introdução dos dados do problema na folha de dados – “Definir Peça/Estrutura” como forma de definir o elemento a ser analisado, tal como se pode ver na Figura 4.8.

Nome Peça	Problema 2	Perfil	RHS 200 x 100 x 10,0	fy	235	yM0	1	yM1	1	Resistência Secção	Plástica	Seleccionar <input checked="" type="checkbox"/>						
Suscep. Torção	Não	lx	lx	C1	C2	L	Mcr	Lcr,y	Lcr,z	NEd	MyEd	MzEd	MyEd,ext	MzEd,ext	Cmy	Cmz	CmLT	Apagar
		1	1	0	0	0	0	4	4	300	30	20	10	20	0,933	0,6	0	

Figura 4.8 - Dados do problema 2 na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura”

Definidos correctamente os dados do problema, em seguida basta verificar os resultados da sua análise na secção “Relatórios”, sendo os seus resultados apresentados nas Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12.

$N_{pl,Rd}$	$V_{z,pl,Rd}$	$V_{y,pl,Rd}$	$M_{c,y,Rd}$	$M_{c,z,Rd}$
1290,2	496,6	248,3	80,1	48,4

Figura 4.9 – Esforços internos máximos resistentes

λ_y	α_y	Φ_y	χ_y	$N_{b,y,Rd}$	λ_z	α_z	Φ_z	χ_z	$N_{b,z,Rd}$
0,612	0,21	0,731	0,884	1140,5	1,071	0,21	1,165	0,616	794,7

Figura 4.10 – Parâmetros da encurvadura por flexão

Mcr	λ_{LT}	α_{LT}	Φ_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,y,Rd}$
-	-	-	-	1	80,1

Figura 4.11 – Parâmetros da encurvadura lateral por flexão-torção

K_{yy}	K_{yz}	K_{zy}	K_{zz}	(6.61)*	(6.62)*	$M_{N,y,Rd}$	$M_{N,z,Rd}$	(6.41)*	VERIFICAÇÃO FINAL
1,034	0,469	0,6204	0,781	0,8441	0,9326	80,1	43	0,2836	VERIFICA

Figura 4.12 – Coeficientes de interacção e verificações

Como é possível averiguar, também nesta análise realizada pela ferramenta de cálculo, o elemento verifica a segurança. Conclui-se que os resultados obtidos pela ferramenta de cálculo são praticamente idênticos aos da resolução manual do exercício. As pequenas diferenças em alguns parâmetros devem-se apenas a arredondamentos.

4.3 Problema 3

Neste problema é abordada uma coluna-viga simplesmente apoiada, submetida a esforço axial de compressão e a momento flector segundo o eixo y da sua secção transversal, tal como se pode verificar pela Figura 4.13.

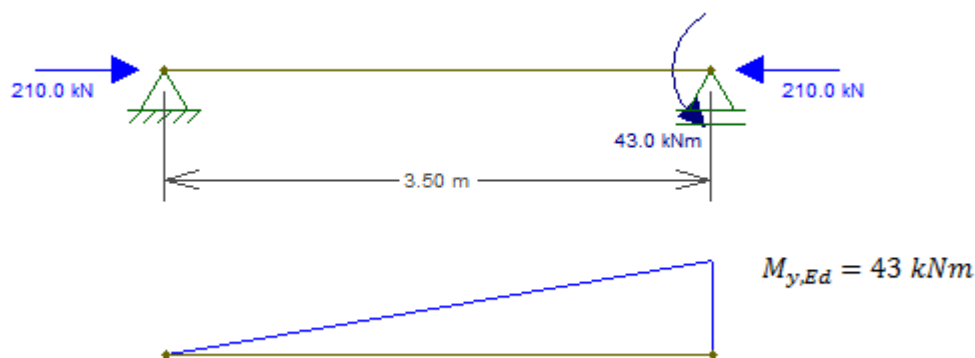


Figura 4.13 - Coluna-viga com perfil IPE 200

O perfil adoptado para o elemento é um *IPE 200* contraventado, i.e., apresenta restrições à instabilidade lateral por flexão-torsão. A tensão de cedência do aço é $f_y = 235 \text{ MPa}$. As Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam as características do perfil adoptado neste problema, as propriedades do material (aço) e valores dos esforços.

Tabela 4.7 - Características do perfil adoptado IPE 200

Comprimento de encurvadura por flexão	$L = 3,5 \text{ m}$
Dimensões da alma e do banzo	$b_f = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$ $h_w = 183 \text{ mm} = 0,183 \text{ m}$ $t_f = 8,5 \text{ mm} = 0,0085 \text{ m}$ $t_w = 5,6 \text{ mm} = 0,0056 \text{ m}$
Área da secção transversal	$A = 28,48 \text{ cm}^2 = 2,848 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Inércia	$I_y = 1943 \text{ cm}^4 = 19,43 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$ $I_z = 142,4 \text{ cm}^4 = 1,424 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$
Módulo de flexão plástico	$W_{pl,y} = 220,6 \text{ cm}^3 = 220,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ $W_{pl,z} = 44,6 \text{ cm}^3 = 44,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
Módulo de flexão elástico	$W_{el,y} = 194,3 \text{ cm}^3 = 194,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ $W_{el,z} = 28,5 \text{ cm}^3 = 28,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
Raio de giração	$i_y = 8,26 \text{ cm} = 82,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $i_z = 2,24 \text{ cm} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Rigidez de torção (Saint-Venant) e constante de empenamento	$I_t = 6,98 \text{ cm}^4 = 69800 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4$ $I_\omega = 12,988 \cdot 10^3 \text{ cm}^6 = 12988 \cdot 10^{-12} \text{ m}^6$

Tabela 4.8 - Propriedades do material (aço)

Módulos de elasticidade e de distorção	$E = 210000.10^3 \text{ kN/m}^2$ $G = 80770.10^3 \text{ kN/m}^2$
Tensão de cedência do aço	$f_y = 235.10^3 \text{ kN/m}^2$
Coeficientes parciais de segurança	$\gamma_{M0} = 1,0$ $\gamma_{M1} = 1,0$

Tabela 4.9 - Esforços internos da coluna-viga

Esforços de compressão	$N_{Ed} = 210 \text{ kN}$
Momento flector máximo no eixo y (a meio vão e nas extremidades)	$M_{y,Ed,extremidade} = 43 \text{ kNm}$
Momento flector máximo no eixo z	$M_{z,Ed} = 0 \text{ kNm}$

4.3.1 Classificação da secção transversal

- i. Alma em compressão:

$$\frac{c}{t} = \frac{d}{t_w} = \frac{183.10^{-3}\text{m}}{5,6.10^{-3}\text{m}} = 32,7$$

$$\text{Classe 1 com limite: } 33 \varepsilon = 33 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 33$$

⇒ A alma em compressão é de classe 1.

- ii. Banzo em compressão:

$$\frac{c}{t} = \frac{0,5 \cdot (b - t_w - 2r)}{t_f} = \frac{0,5 \cdot (100.10^{-3}\text{m} - 5,6.10^{-3}\text{m} - 2 \cdot 12.10^{-3}\text{m})}{8,5.10^{-3}\text{m}} = 4,1$$

$$\text{Classe 1 com limite: } 9 \varepsilon = 9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 9$$

⇒ A alma em compressão é de classe 1.

⇒ Logo a secção transversal é de classe 1, i.e, a resistência é plástica.

4.3.2 Verificações da segurança do elemento analiticamente

- i. Factores de redução para a encurvadura:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{210000.10^3 \text{ kN/m}^2}{235.10^3 \text{ kN/m}^2}} = 93,9$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr}}{i_y} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{3,5 \text{ m}}{82,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \frac{1}{93,9} = 0,451$$

Parâmetro de imperfeição para encurvadura no eixo y da secção transversal: $\alpha_y = 0,21$

$$\Phi_y = 0,5 \left[1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21(0,451 - 0,2) + 0,451^2] = 0,628$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + (\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2)^{1/2}} = \frac{1}{0,628 + (0,628^2 - 0,451^2)^{1/2}} = 0,939 \leq 1$$

ii. Factor de momento equivalente:

$$\psi_y = \frac{M_{y,Ed,extremidade \text{ direita}}}{M_{y,Ed,extremidade \text{ esquerda}}} = \frac{0}{43 \text{ kNm}} = 1$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi_y = 0,6 + 0,4 \cdot 0 = 0,6 \geq 0,4$$

iii. Factores de interacção:

$$N_{c,Rk} = A \cdot f_y = 2,848 \cdot 10^3 \text{ m}^2 \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 = 669 \text{ kN}$$

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{c,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{210 \text{ kN}}{0,939 \frac{669 \text{ kN}}{1,0}} = 0,334$$

$$\bar{\lambda}_y < 1 : k_{yy} = C_{my} [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2)n_y] = 0,600 [1 + (0,451 - 0,2)0,334] = 0,650$$

iv. Verificação:

$$M_{pl,y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 220,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 = 51,8 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{210 \text{ kN}}{0,939 \frac{669 \text{ kN}}{1,0}} + 1,030 \frac{30 \text{ kNm}}{1,0 \frac{51,8 \text{ kNm}}{1,0}} = 0,874 \leq 1$$

⇒ A coluna-viga verifica a segurança.

Em seguida procede-se à verificação das secções de extremidade do elemento, onde se começa por verificar se é necessário ter em conta a redução do momento flector resistente plástico.

$$n = \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{c,Rk}}{\gamma_{M0}}} = \frac{210 \text{ kN}}{\frac{669 \text{ kN}}{1,0}} = 0,314 \geq 0,25$$

$$n_w = \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{h_w \cdot t_w \cdot f_y} = \frac{210 \text{ kN} \cdot 1,0}{0,183 \text{ m} \cdot 5,6 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2} = 0,872 \leq 1$$

Assim, terá de proceder-se à verificação dos momentos de extremidade do elemento. Apenas os momentos da extremidade direita do elemento necessitam de ser verificados, pois é nesta extremidade que se verificam maiores valores de momento flector, e os restantes esforços são iguais aos da outra extremidade.

$$a = \frac{(A - 2 \cdot b_f \cdot t_f)}{A} = \frac{(2,848 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 - 2 \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} \text{ m})}{2,848 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 0,403 \leq 0,5$$

$$M_{N,pl,y,Rd} = \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a} \frac{M_{pl,y,Rk}}{\gamma_{m0}} = \frac{1-0,314}{1-0,5 \cdot 0,403} \frac{51,8 \text{ kNm}}{1,0} = 44,7 \text{ kNm} \leq \frac{M_{pl,y,Rk}}{\gamma_{m0}} = \frac{51,8 \text{ kNm}}{1,0} = 51,8 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y = 44,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 = 10,5 \text{ kNm}$$

$$\text{Para } n \leq a: M_{N,pl,z,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rk}}{\gamma_{m0}} = \frac{10,5 \text{ kNm}}{1,0} = 10,5 \text{ kNm}$$

$$\alpha = 2$$

$$\beta = 5 \cdot n = 5 \cdot 0,314 = 1,57 \geq 1$$

$$\left[\frac{M_{y,Ed,extremidade \text{ direita}}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed,extremidade \text{ direita}}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta =$$

$$= \left[\frac{43 \text{ kNm}}{44,7 \text{ kNm}} \right]^2 + \left[\frac{0}{10,5 \text{ kNm}} \right]^{1,57} = 0,925 \leq 1$$

⇒ As secções de extremidade verificam a segurança.

4.3.3 Verificações da segurança do elemento recorrendo à ferramenta de cálculo

Começa-se pela introdução dos dados do problema na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura” como forma de definir o elemento a ser analisado, tal como se pode ver na Figura 4.14.

Nome Peça	Problema 3	Perfil	IPE 200	fy	235	yM0	1	yM1	1	Resistência Secção	Plástica	Seleccionar <input checked="" type="checkbox"/>	
Suscep. Torção	Não	kz	1	kw	1	C1	0	C2	0	L	0	Mcr	0
		Lcr,y	3,5	Lcr,z	0	NEd	210	MyEd	43	MzEd	0	MyEd,ext	43
						MzEd,ext	0	Cmy	0,6	Cmz	0	CmLT	0

Figura 4.14 – Dados do problema 3 na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura”

Definidos correctamente os dados do problema, em seguida basta verificar os resultados da sua análise na secção “Relatórios”, sendo os seus resultados apresentados nas Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18.

$N_{pl,Rd}$	$V_{z,pl,Rd}$	$V_{y,pl,Rd}$	$M_{c,y,Rd}$	$M_{c,z,Rd}$
669,3	189,9	230,7	51,8	10,5

Figura 4.15 – Esforços internos máximos resistentes

λ_y	α_y	Φ_y	χ_y	$N_{b,y,Rd}$	λ_z	α_z	Φ_z	χ_z	$N_{b,z,Rd}$
0,451	0,21	0,628	0,939	628,5	0	0,34	0,466	1	669,3

Figura 4.16 – Parâmetros da encurvadura por flexão

Mcr	λ_{LT}	α_{LT}	Φ_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,y,Rd}$
-	-	-	-	1	51,8

Figura 4.17 – Parâmetros da encurvadura lateral por flexão-torção

Kyy	Kyz	Kzy	Kzz	(6.61)*	(6.62)*	MN,y,Rd	MN,z,Rd	(6.41)*	VERIFICAÇÃO FINAL
0,65	0	0	0	0,8737	0,3138	44,5	10,3	0,9337	VERIFICA

Figura 4.18 – Coeficientes de interacção e verificações

Como é possível averiguar, também nesta análise realizada pela ferramenta de cálculo, o elemento verifica a segurança. Conclui-se que os resultados obtidos pela ferramenta de cálculo são praticamente idênticos aos da resolução manual do exercício. As pequenas diferenças em alguns parâmetros devem-se apenas a arredondamentos.

4.4 Problema 4

Neste problema é abordada uma coluna-viga simplesmente apoiada, submetida a esforço axial de compressão e a momento flector em ambos os eixos da sua secção transversal, tal como se pode verificar pela Figura 4.19.

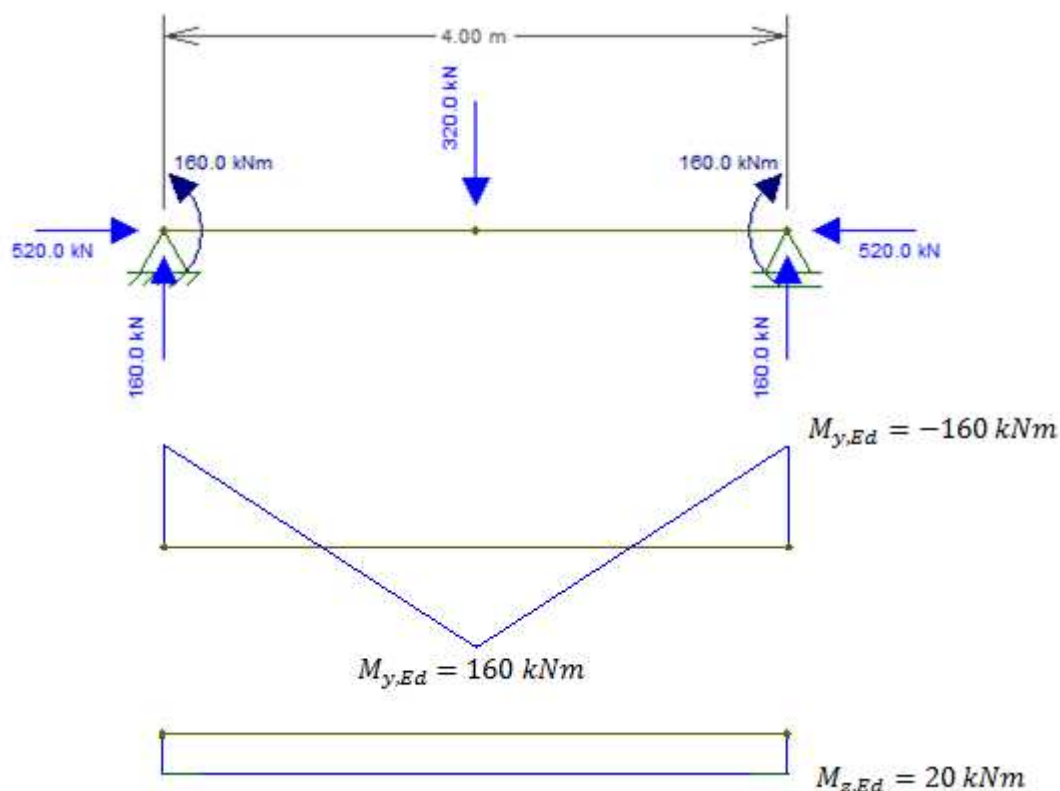


Figura 4.19 - Coluna-viga com perfil IPE 500

O perfil adoptado para o elemento é um *IPE 500* não contraventado, e por isso susceptível a instabilidade lateral por flexão-torção. A tensão de cedência do aço é $f_y = 275 \text{ MPa}$. As Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam as características do perfil adoptado neste problema, as propriedades do material (aço), tal como os valores dos esforços.

Tabela 4.10 - Características do perfil adoptado IPE 500

Comprimento de encurvadura por flexão	$L = 4,0 \text{ m}$
Dimensões da alma e do banzo	$b_f = 200 \text{ mm} = 0,2 \text{ m}$ $h_w = 426 \text{ mm} = 0,426 \text{ m}$ $t_f = 16 \text{ mm} = 0,016 \text{ m}$ $t_w = 10,2 \text{ mm} = 0,0102 \text{ m}$
Área da secção transversal	$A = 115,5 \text{ cm}^2 = 11,55 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Inércia	$I_y = 48200 \text{ cm}^4 = 482 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$ $I_z = 2142 \text{ cm}^4 = 21,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$
Módulo de flexão plástico	$W_{pl,y} = 2194 \text{ cm}^3 = 2194 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ $W_{pl,z} = 335,9 \text{ cm}^3 = 335,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
Módulo de flexão elástico	$W_{el,y} = 1928 \text{ cm}^3 = 1928 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ $W_{el,z} = 214,2 \text{ cm}^3 = 214,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
Raio de giração	$i_y = 20,4 \text{ cm} = 204 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $i_z = 4,31 \text{ cm} = 43,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Rigidez de torção (Saint-Venant)	$I_t = 89,29 \text{ cm}^4 = 892900 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4$ $I_\omega = 1249 \cdot 10^3 \text{ cm}^6 = 1249000 \cdot 10^{-12} \text{ m}^6$

Tabela 4.11 - Propriedades do material (aço)

Módulos de elasticidade e de distorção	$E = 210000 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$ $G = 80770 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
Tensão de cedência do aço	$f_y = 275 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
Coeficientes parciais de segurança	$\gamma_{M0} = 1,0$ $\gamma_{M1} = 1,0$

Tabela 4.12 - Esforços internos da coluna-viga

Esforços de compressão	$N_{Ed} = 520 \text{ kN}$
Momento flector máximo no eixo y (a meio vão e nas extremidades)	$M_{y,Ed,meio \text{ vão}} = 160 \text{ kNm}$ $M_{y,Ed,extremidade} = 160 \text{ kNm}$
Momento flector máximo no eixo z	$M_{z,Ed,meio \text{ vão}} = 20 \text{ kNm}$ $M_{z,Ed,extremidade} = 20 \text{ kNm}$

4.4.1 Classificação da secção transversal

i. Alma em compressão:

$$\frac{c}{t} = \frac{d}{t_w} = \frac{426 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{10,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 41,8$$

Se for assumida uma distribuição plástica das tensões do perfil:

$$\begin{aligned} \alpha \cdot c &= 0,5 \cdot d + \frac{0,5 \cdot N_{Ed}}{t_w \cdot f_y} = \\ &= 0,5 \cdot 426 \cdot 10^{-3} \text{ m} + \frac{0,5 \cdot 520 \text{ kN}}{10,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 275 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2} = 305,7 \cdot 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

Logo, $\alpha = 0,718 > 0,5$

Classe 1 para uma combinação de momento flector e compressão com limite:

$$\frac{396. \varepsilon}{13. \alpha - 1} = \frac{396.0,92}{13.0,718 - 1} = 43,7$$

⇒ A alma é de classe 1.

ii. Banzo em compressão:

$$\frac{c}{t} = \frac{0,5. (b - t_w - 2r)}{t_f} = \frac{0,5. (200. 10^{-3}m - 10,2. 10^{-3}m - 2.21. 10^{-3}m)}{16. 10^{-3}m} = 4,6$$

$$\text{Classe 1 com limite: } 9 \varepsilon = 9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 9 \sqrt{\frac{235}{275}} = 8,3$$

⇒ O banzo em compressão é de classe 1.

⇒ Logo a secção transversal é de classe 1, i.e., a resistência é plástica.

4.4.2 Verificações da segurança do elemento analiticamente

i. Factores de redução para a encurvadura:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{210000. 10^3 \text{ kN/m}^2}{275. 10^3 \text{ kN/m}^2}} = 86,8$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr}}{i_y} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4 \text{ m}}{204. 10^{-3} \text{ m}} \frac{1}{86,8} = 0,226$$

Parâmetro de imperfeição para encurvadura no eixo y da secção transversal: $\alpha_y = 0,21$

$$\Phi_y = 0,5 \left[1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21(0,226 - 0,2) + 0,226^2] = 0,528$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + (\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2)^{1/2}} = \frac{1}{0,528 + (0,528^2 - 0,226^2)^{1/2}} = 0,995 \leq 1$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_z} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4 \text{ m}}{43,1. 10^{-3} \text{ m}} \frac{1}{86,8} = 1,069$$

Parâmetro de imperfeição para encurvadura no eixo z da secção transversal: $\alpha_z = 0,34$

$$\Phi_z = 0,5 \left[1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 [1 + 0,34(1,069 - 0,2) + 1,069^2] = 1,219$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + (\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2)^{1/2}} = \frac{1}{1,219 + (1,219^2 - 1,069^2)^{1/2}} = 0,554 \leq 1$$

Para o cálculo do momento crítico foi considerado $k_z = k_w = 1,0$, $C_1 = 1,565$ e $C_2 = 1,267$.

Assim,

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k_z \cdot L)^2} \left(\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k_z \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - (C_2 \cdot z_g) \right)$$

$$M_{cr} = 1,565 \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 \cdot 21,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}{(1,0 \cdot 4 \text{ m})^2} \left(\sqrt{\left(\frac{1,0}{1,0}\right)^2 \frac{1249000 \cdot 10^{-12} \text{ m}^6}{21,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4} + \frac{(1,0 \cdot 4 \text{ m})^2 \cdot 80770 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 \cdot 892900 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4}{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 \cdot 21,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4} + \left(1,267 \cdot \frac{0,5 \text{ m}}{2}\right)^2} - \left(1,267 \cdot \frac{0,5 \text{ m}}{2}\right) \right) = 490313,8895 \text{ Nm} = 490,3139 \text{ KNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2194 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 275 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2}{490,314 \text{ kNm}}} = 1,109$$

Parâmetro de imperfeição para encurvadura lateral: $\alpha_{LT} = 0,34$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 [1 + 0,34(1,109 - 0,2) + 1,109^2] = 1,269$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + (\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2)^{1/2}} = \frac{1}{1,269 + (1,269^2 - 1,109^2)^{1/2}} = 0,530 \leq 1$$

ii. Factor de momento equivalente:

$$\psi_y = \frac{M_{y,Ed,extremidade direita}}{M_{y,Ed,extremidade esquerda}} = \frac{-160 \text{ kNm}}{-160 \text{ kNm}} = 1$$

$$M_s = M_{y,Ed \text{ meio vão}} = 160 \text{ kNm}$$

$$M_h = -160 \text{ kNm}$$

$$\alpha_h = \frac{M_s}{M_h} = \frac{-160 \text{ kNm}}{-160 \text{ kNm}} = -1$$

$$C_{my} = C_{mLT} = -0,8. \alpha_h = -0,8. (-1) = 0,8$$

$$\psi_z = \frac{M_{z,Ed,extremidade\ direita}}{M_{z,Ed,extremidade\ esquerda}} = \frac{20\ kNm}{20\ kNm} = 1$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4. \psi_z = 0,6 + 0,4.1 = 1,0 \geq 0,4$$

iii. Factores de interacção:

$$N_{c,Rk} = A. f_y = 11,55. 10^{-3}\ m^2. 275. 10^3\ kN/m^2 = 3176,3\ kN$$

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{c,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{520\ kN}{0,995 \frac{3176,3\ kN}{1,0}} = 0,165$$

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{c,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{520\ kN}{0,554 \frac{3176,3\ kN}{1,0}} = 0,296$$

$$\bar{\lambda}_y < 1 : k_{yy} = C_{my}[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2)n_y] = 0,8[1 + (0,226 - 0,2). 0,165] = 0,803$$

$$\bar{\lambda}_z > 1 : k_{zz} = C_{mz}[1 + 1,4. n_z] = 1,0[1 + (1,4. 0,296)] = 1,414$$

$$k_{yz} = 0,6. k_{zz} = 0,6. 1,414 = 0,848$$

$$\bar{\lambda}_z > 1 : k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1. \bar{\lambda}_z}{C_{mLT} - 0,25} \right] \cdot n_z = \left[1 - \frac{0,1. 1,069}{0,8 - 0,25} \right] \cdot 0,296 = 0,942$$

iv. Verificação:

$$M_{pl,y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 2194. 10^{-6}\ m^3. 275. 10^3\ kN/m^2 = 603,4\ kNm$$

$$M_{pl,z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y = 335,9. 10^{-6}\ m^3. 275. 10^3\ kN/m^2 = 92,4\ kNm$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{520\ kN}{0,995 \frac{3176,3\ kN}{1,0}} + 0,803 \frac{160\ kNm}{0,530. \frac{603,4\ kNm}{1,0}} + 0,848 \frac{20\ kNm}{\frac{92,4\ kNm}{1,0}} = 0,750 \leq 1 \end{aligned}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$= \frac{520 \text{ kN}}{0,554 \cdot \frac{3176,3 \text{ kN}}{1,0}} + 0,942 \cdot \frac{160 \text{ kNm}}{0,530 \cdot \frac{603,4 \text{ kNm}}{1,0}} + 1,414 \cdot \frac{20 \text{ kNm}}{\frac{92,4 \text{ kNm}}{1,0}} = 1,073 > 1$$

⇒ A coluna-viga não verifica a segurança.

4.4.3 Verificações da segurança do elemento recorrendo à ferramenta de cálculo

Começa-se pela introdução dos dados do problema na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura” como forma de definir o elemento a ser analisado, tal como se pode ver na Figura 4.20.

Figura 4.20 – Dados do problema 4 na folha de dados – “Definir Peça/Estrutura”

Definidos correctamente os dados do problema, em seguida basta verificar os resultados da sua análise na secção “Relatórios”, sendo os seus resultados os apresentados nas Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24.

Npl,Rd	Vz,pl,Rd	Vy,pl,Rd	Mc,y,Rd	Mc,z,Rd
3176,2	950,6	1016,1	603,4	92,4

Figura 4.21 – Esforços internos máximos resistentes

λ_y	α_y	Φ_y	χ_y	Nb,y,Rd	λ_z	α_z	Φ_z	χ_z	Nb,z,Rd
0,226	0,21	0,528	0,995	3160,4	1,07	0,34	1,22	0,554	1759,6

Figura 4.22 – Parâmetros da encurvadura por flexão

Mcr	λ_{LT}	α_{LT}	Φ_{LT}	χ_{LT}	Mb,y,Rd
490,3139	1,109	0,34	1,269	0,53	319,8

Figura 4.23 – Parâmetros da encurvadura lateral por flexão-torção

Kyy	Kyz	Kzy	Kzz	(6.61)*	(6.62)*	MN,y,Rd	MN,z,Rd	(6.41)*	VERIFICAÇÃO FINAL
0,803	0,848	0,943	1,414	0,7498	1,0734	X	X	X	NÃO VERIFICA

Figura 4.24 - Coeficientes de interacção e verificações

Como é possível averiguar, também nesta análise realizada pela ferramenta de cálculo, o elemento não verifica a segurança. Conclui-se que os resultados obtidos pela ferramenta de cálculo são praticamente idênticos aos da resolução manual do exercício. As pequenas diferenças em alguns parâmetros devem-se apenas a arredondamentos.

4.5 Problema 5

Neste problema será abordado um pórtico de três pisos, tal como demonstra a Figura 4.25.

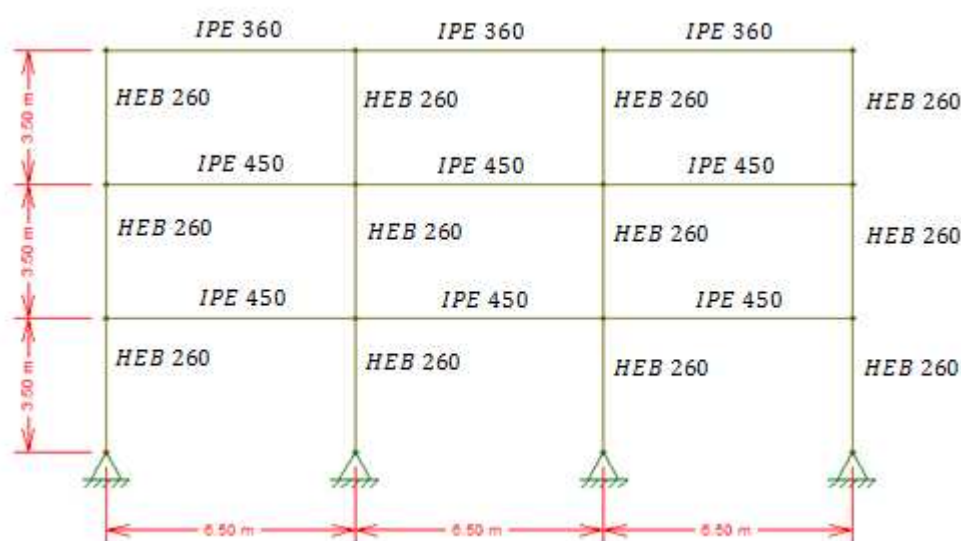


Figura 4.25 – Pórtico com pilares de perfil HEB 260, vigas intermédias de perfil IPE 450 e viga de topo IPE 360

O pórtico tem assim 19,5 metros de comprimento e 10,5 metros de altura, com cada um dos seus três vãos de 6,5 metros, e com 3,5 metros de altura entre os seus pisos.

4.5.1 Cargas consideradas

Os valores das cargas verticais (permanentes e sobrecargas) são os indicados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Forças verticais actuantes no pórtico

	Cargas Permanentes (G)	Sobrecargas (Q)
Piso superior	20 kN/m	6 kN/m
Pisos intermédios	30 kN/m	18 kN/m

Relativamente às cargas horizontais consideradas, são devidas à acção do vento, assumindo os valores indicados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Forças horizontais actuantes no pórtico

	Cargas horizontais (W)
Piso superior	9,5 kN
Pisos intermédios	19 kN

4.5.2 Combinações de carregamento

A combinação de carregamento para o estado limite último do pórtico foi considerada através da expressão:

$$1,35 G + 1,5 W + 1,05 Q$$

tendo em conta a disposição dos carregamentos no pórtico ilustrados na Figura 4.26.

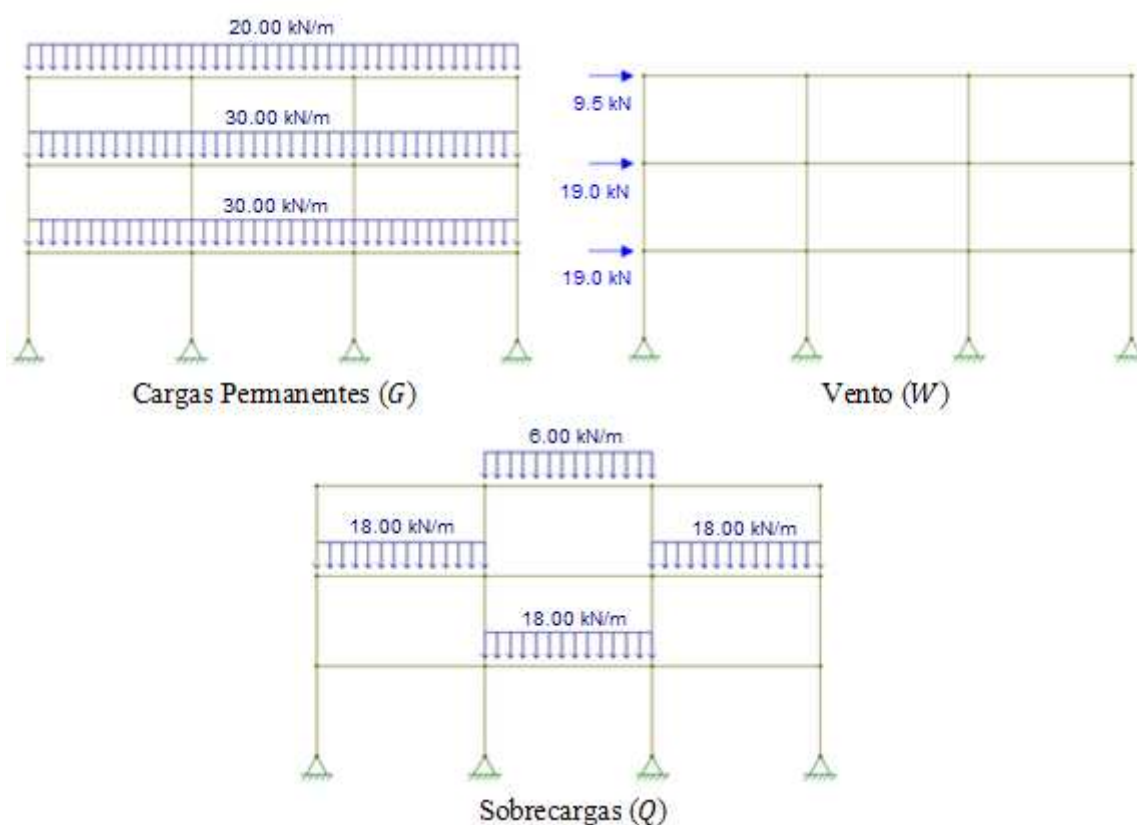


Figura 4.26 – Diferentes carregamentos considerados para o pórtico

4.5.3 Imperfeições do pórtico

A consideração das imperfeições do pórtico são tidas em conta pela atribuição de cargas horizontais equivalentes (ver secção 3.3.3.3).

A carga horizontal equivalente é tida em conta para cada piso do pórtico através da expressão $H_{Ed} = \phi V_{Ed}$. A Tabela 4.15 revela os valores das cargas horizontais tidas em conta na análise, variando o seu valor consoante o piso e o carregamento considerados.

Tabela 4.15 - Cargas horizontais equivalentes

Cargas	Piso	$V_{Ed} (kN)$	$H_{Ed} (kN)$
G	Piso superior	390	1,03
	Piso 2	585	1,54
	Piso 1	585	1,54
I_2	Piso superior	39	0,10
	Piso 2	234	0,62
	Piso 1	117	0,31

Não se verificando que as forças horizontais sejam iguais ou superiores a 15% das forças verticais actuantes num piso do pórtico ($H_{Ed} \geq 0,15 \cdot V_{Ed}$), de acordo com o EC3, as imperfeições globais do pórtico serão contabilizadas através de uma carga horizontal equivalente.

4.5.4 Determinação das cargas últimas

Procede-se à classificação da estrutura relativamente à contabilização dos efeitos de 2ª ordem, tal como indicado pela Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Cargas e classificação do pórtico

Piso	$\delta_{H,Ed} (mm)$	$V_{Ed} (kN)$	$H_{Ed} (kN)$	α_{cr}
Piso superior	1,27	567,5	15,7	76,44
Piso 2	3,80	1602,9	47,0	27,00
Piso 1	14,98	2515,5	77,9	7,23

O valor do factor de amplificação α a ser aplicado no cálculo do momento flector devido aos efeitos de 2ª ordem para cada caso de combinação de carregamento é dado na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Factor de amplificação

α_{cr}	$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}}$
7,23	1,16

Dado que o parâmetro de carga crítica é inferior a 10 ($\alpha_{cr} < 10$), a análise do pórtico exige a consideração dos efeitos de 2ª ordem. Assim, determinado o valor do factor de amplificação, é apresentada na Tabela 4.18 a alteração do factor parcial de segurança relativo às cargas verticais (H_{Ed}), através da sua multiplicação pelo factor de amplificação ($\alpha \cdot H_{Ed}$).

Tabela 4.18 - Alterações dos factores parciais de segurança incluindo os efeitos de amplificação

G	W	I_2	α
1,35	1,74	1,05	1,16

Determinaram-se os diagramas de esforços apresentados na Figura 4.27, relativos a um pilar intermédio do pórtico (perfil *HEB 260*).

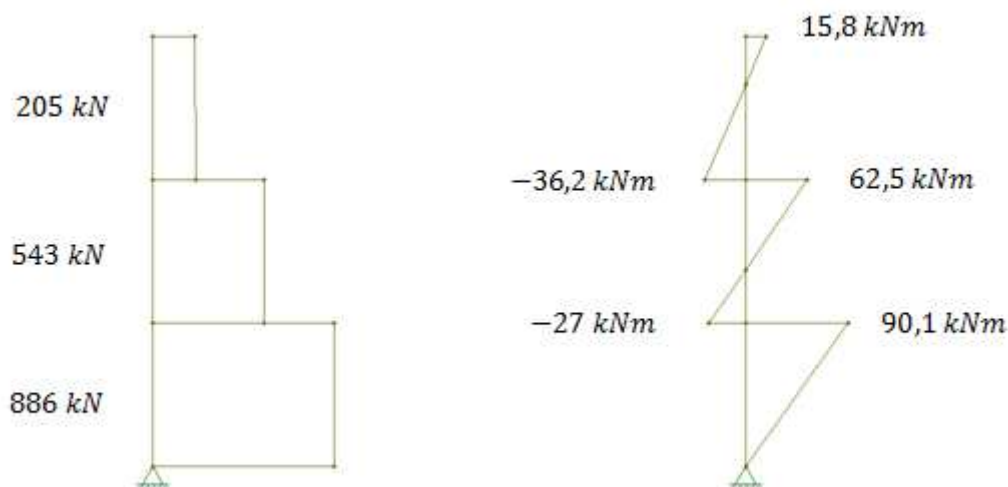


Figura 4.27 - Esforços internos (N e M_y) interior do pórtico, incluindo imperfeições geométricas e efeitos de 2ª ordem

Para a verificação do elemento serão tidos em conta os valores $N_{Ed} = 886 \text{ kN}$ e $M_{y,Ed} = 90,1 \text{ kNm}$, esforços relativos aos pilares intermédios do piso inferior do pórtico.

O elemento é susceptível à torção, e a tensão de cedência do aço é $f_y = 235 \text{ MPa}$. As Tabelas 4.19, 4.20 e 4.21 apresentam as características do perfil adoptado neste problema, as propriedades do material (aço) e os esforços internos máximos considerados na análise.

Tabela 4.19 - Características do perfil adoptado IPE 500

Comprimento de encurvadura por flexão	$L = 3,5 \text{ m}$	
Dimensões da alma e do banzo	$b_f = 260 \text{ mm} = 0,26 \text{ m}$ $t_f = 17,5 \text{ mm} = 0,0175 \text{ m}$	$h_w = 177 \text{ mm} = 0,177 \text{ m}$ $t_w = 10 \text{ mm} = 0,010 \text{ m}$
Área da secção transversal	$A = 118,4 \text{ cm}^2 = 11,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$	
Inércia	$I_y = 14920 \text{ cm}^4 = 149,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$ $I_z = 5135 \text{ cm}^4 = 51,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$	
Módulo de flexão plástico	$W_{pl,y} = 1283 \text{ cm}^3 = 1283 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ $W_{pl,z} = 602,2 \text{ cm}^3 = 602,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	
Módulo de flexão elástico	$W_{el,y} = 1148 \text{ cm}^3 = 1148 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ $W_{el,z} = 395 \text{ cm}^3 = 395 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	
Raio de giração	$i_y = 11,22 \text{ cm} = 112,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $i_z = 6,58 \text{ cm} = 65,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	
Rigidez de torção (Saint-Venant)	$I_t = 123,8 \text{ cm}^4 = 1238000 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4$ $I_\omega = 753,7 \cdot 10^3 \text{ cm}^6 = 753700 \cdot 10^{-12} \text{ m}^6$	

Tabela 4.20 - Propriedades do material (aço)

Módulos de elasticidade e de distorção	$E = 210000.10^3 \text{ kN/m}^2$ $G = 80770.10^3 \text{ kN/m}^2$
Tensão de cedência do aço	$f_y = 235.10^3 \text{ kN/m}^2$
Coefficientes parciais de segurança	$\gamma_{M0} = 1,0$ $\gamma_{M1} = 1,0$

Tabela 4.21 - Esforços internos da coluna-viga

Esforços de compressão	$N_{Ed} = 886 \text{ kN}$
Momento flector máximo no eixo y	$M_{y,Ed,extremidade} = 90,1 \text{ kNm}$
Momento flector máximo no eixo z	$M_{z,Ed} = 0$

4.5.5 Classificação da secção transversal

i. Alma em compressão:

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{177.10^{-3}\text{m}}{10.10^{-3}\text{m}} = 17,7$$

$$\text{Classe 1 com limite: } 33 \varepsilon = 33 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 33$$

⇒ A alma em compressão é de classe 1.

ii. Banzo em compressão:

$$\frac{c}{t} = \frac{0,5 \cdot (b - t_w - 2r)}{t_f} = \frac{0,5 \cdot (260.10^{-3}\text{m} - 10.10^{-3}\text{m} - 2 \cdot 24.10^{-3}\text{m})}{17,5.10^{-3}\text{m}} = 5,77$$

$$\text{Classe 1 com limite: } 9 \varepsilon = 9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 9$$

⇒ A alma em compressão é de classe 1.

⇒ Logo a secção transversal é de classe 1, i.e. a resistência é plástica.

4.5.6 Comprimentos de encurvadura

Foram determinados os seguintes comprimentos de encurvadura:

- $L_{cr,y} = 2,72 \text{ m}$
- $L_{cr,z} = 3,5 \text{ m}$

4.5.7 Verificações da segurança do elemento analiticamente

i. Factores de redução para a encurvadura:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{210000 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2}{235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2}} = 93,9$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr}}{i_y} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2,72 \text{ m}}{112,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \frac{1}{93,9} = 0,258$$

Parâmetro de imperfeição para encurvadura no eixo y da secção transversal: $\alpha_y = 0,34$

$$\Phi_y = 0,5 \left[1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 [1 + 0,34(0,258 - 0,2) + 0,258^2] = 0,543$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + (\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2)^{1/2}} = \frac{1}{0,543 + (0,543^2 - 0,258^2)^{1/2}} = 0,979 \leq 1$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_z} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{3,5 \text{ m}}{65,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \frac{1}{93,9} = 0,566$$

Parâmetro de imperfeição para encurvadura no eixo z da secção transversal: $\alpha_z = 0,49$

$$\Phi_z = 0,5 \left[1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 [1 + 0,49(0,566 - 0,2) + 0,566^2] = 0,750$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + (\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2)^{1/2}} = \frac{1}{0,750 + (0,750^2 - 0,566^2)^{1/2}} = 0,805 \leq 1$$

Para o cálculo do momento crítico foi considerado $k_z = k_w = 1,0$ e $C_1 = 1,77$. Assim,

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k_z \cdot L)^2} \left(\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k_z \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} + (C_2 \cdot z_g)^2 - (C_2 \cdot z_g) \right)$$

$$\begin{aligned} M_{cr} &= 1,77 \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 \cdot 51,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}{(1,0 \cdot 3,5 \text{ m})^2} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{1,0}{1,0} \right)^2 \frac{753700 \cdot 10^{-12} \text{ m}^6}{51,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4} + \frac{(1,0 \cdot 3,5 \text{ m})^2 \cdot 80770 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 \cdot 1238000 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4}{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 \cdot 51,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}} \right) = \\ &= 2488509 \text{ Nm} = 2488,509 \text{ KNm} \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1283 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2}{2488,509 \text{ KNm}}} = 0,348 \leq 0,4 \rightarrow \chi_{LT} = 1$$

ii. Factor de momento equivalente:

$$\psi_y = \frac{M_{y,Ed,extremidade\ direita}}{M_{y,Ed,extremidade\ esquerda}} = \frac{90,1 \text{ kNm}}{0} = 0$$

$$C_{my} = C_{mLT} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi_y = 0,6 + 0,4 \cdot 0 = 0,6 \geq 0,4$$

$$\psi_z = \frac{M_{z,Ed,extremidade\ direita}}{M_{z,Ed,extremidade\ esquerda}} = 0$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi_z = 0,6 + 0,4 \cdot 0 = 0,6 \geq 0,4$$

iii. Factores de interacção:

$$N_{pL,Rk} = A \cdot f_y = 11,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 = 2782,4 \text{ kN}$$

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{c,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{886 \text{ kN}}{0,979 \frac{2782,4 \text{ kN}}{1,0}} = 0,325$$

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{c,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{886 \text{ kN}}{0,805 \frac{2782,4 \text{ kN}}{1,0}} = 0,396$$

$$\bar{\lambda}_y < 1 : k_{yy} = C_{my} [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) n_y] = 0,6 [1 + (0,258 - 0,2) \cdot 0,325] = 0,611$$

$$\bar{\lambda}_z < 1 : k_{zz} = C_{mz} [1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) n_z] = 0,6 \cdot [1 + (2 \cdot 0,566 - 0,6) \cdot 0,396] = 0,726$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,6 \cdot 0,726 = 0,436$$

$$1 > \bar{\lambda}_z \geq 0,4 : k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1}{C_{mLT} - 0,25} \cdot n_z \right] = \left[1 - \frac{0,1}{0,6 - 0,25} \cdot 0,396 \right] = 0,887$$

iv. Verificação:

$$M_{pLy,Rk} = W_{pLy} \cdot f_y = 1283 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 = 301,5 \text{ KNm}$$

$$M_{pLz,Rk} = W_{pLz} \cdot f_y = 602,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 = 141,5 \text{ KNm}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{m1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{m1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{m1}}} =$$

$$= \frac{886 \text{ kN}}{0,979 \frac{2782,4 \text{ kN}}{1,0}} + 0,611 \frac{90,1 \text{ kNm}}{1,0 \frac{301,5 \text{ kNm}}{1,0}} + 0,436 \frac{0}{\frac{141,5 \text{ kNm}}{1,0}} = 0,508 \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{m1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{m1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{m1}}} =$$

$$= \frac{886 \text{ kN}}{0,805 \frac{2782,4 \text{ kN}}{1,0}} + 0,887 \cdot \frac{90,1 \text{ kNm}}{1,0 \frac{301,5 \text{ kNm}}{1,0}} + 0,726 \cdot \frac{0}{\frac{141,5 \text{ kNm}}{1,0}} = 0,661 \leq 1$$

⇒ A coluna-viga verifica a segurança.

Em seguida procede-se à verificação das secções de extremidade do elemento, onde se começa por verificar se é necessário ter em conta a redução do momento flector resistente plástico.

$$n = \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{c,Rk}}{\gamma_{M0}}} = \frac{886 \text{ kN}}{\frac{2782,4 \text{ kN}}{1,0}} = 0,318 \geq 0,25$$

$$n_w = \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{h_w \cdot t_w \cdot f_y} = \frac{886 \text{ kN} \cdot 1,0}{0,177 \text{ m} \cdot 0,01 \text{ m} \cdot 235 \cdot 10^3 \text{ kN/m}} = 2,13 \geq 1$$

Assim, terá de proceder-se à verificação dos momentos de extremidade do elemento. Apenas os momentos da extremidade superior do elemento necessitam de ser verificados, pois é nesta extremidade que se verificam maiores valores de momento flector.

$$a = \frac{(A - 2 \cdot b \cdot t_f)}{A} = \frac{(11,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 - 2 \cdot 0,26 \text{ m} \cdot 0,0175 \text{ m})}{11,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 0,231 \leq 0,5$$

$$M_{N,pl,y,Rd} = \frac{1 - n}{1 - 0,5 \cdot a} \frac{M_{pl,y,Rk}}{\gamma_{m0}} = \frac{1 - 0,318}{1 - 0,5 \cdot 0,231} \frac{301,5 \text{ kNm}}{1,0} = 232,5 \text{ kNm} \geq \frac{M_{pl,y,Rk}}{\gamma_{m0}}$$

$$= \frac{301,5 \text{ kNm}}{1,0} = 301,5 \text{ kNm}$$

$$\text{Para } n > a: M_{N,pl,z,Rd} = \frac{M_{pl,z,Rk}}{\gamma_{m0}} \left[1 - \left(\frac{n - a}{1 - a} \right)^2 \right] = \frac{141,5 \text{ kNm}}{1,0} \left[1 - \left(\frac{0,318 - 0,231}{1 - 0,231} \right)^2 \right] =$$

$$= 139,7 \text{ kNm}$$

$$\alpha = 2$$

$$\beta = 5. n = 5,0,318 = 1,59 \geq 1$$

$$\left[\frac{M_{y,Ed,extremidade\ direita}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed,extremidade\ direita}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta =$$

$$= \left[\frac{90,1 \cdot 10^3 \text{ Nm}}{232,5 \cdot 10^3 \text{ Nm}} \right]^2 + \left[\frac{0}{139,7 \cdot 10^3 \text{ Nm}} \right]^{1,59} = 0,151 \leq 1$$

⇒ As secções de extremidade verificam a segurança.

4.5.8 Verificações da segurança do elemento recorrendo à ferramenta de cálculo

Começa-se pela introdução dos dados do problema na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura” como forma de definir o elemento a ser analisado, tal como se pode ver na Figura 4.28.

Figura 4.28 - Dados do problema 5 na “folha de dados” – “Definir Peça/Estrutura”

Definidos correctamente os dados do problema, em seguida basta verificar os resultados da sua análise na secção “Relatórios”, sendo os seus resultados os apresentados nas Figuras 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32.

$N_{pl,Rd}$	$V_{z,pl,Rd}$	$V_{y,pl,Rd}$	$M_{c,y,Rd}$	$M_{c,z,Rd}$
2782,4	510	1234,7	301,5	141,5

Figura 4.29 - Esforços internos máximos resistentes

λ_y	α_y	Φ_y	χ_y	$N_{b,y,Rd}$	λ_z	α_z	Φ_z	χ_z	$N_{b,z,Rd}$
0,258	0,34	0,543	0,98	2726,8	0,567	0,49	0,751	0,804	2237

Figura 4.30 - Parâmetros da encurvadura por flexão

M_{cr}	λ_{LT}	α_{LT}	Φ_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,y,Rd}$
2488,509	0,348	0,21	0,576	1	301,5

Figura 4.31 - Parâmetros da encurvadura lateral por flexão-torção

K_{yy}	K_{yz}	K_{zy}	K_{zz}	(6.61)*	(6.62)*	$M_{N,y,Rd}$	$M_{N,z,Rd}$	(6.41)*	VERIFICAÇÃO FINAL
0,611	0,436	0,887	0,727	0,5075	0,6611	232,4	139,7	0,1503	VERIFICA

Figura 4.32 - Coeficientes de interacção e verificações

Como é possível averiguar, também nesta análise realizada pela ferramenta de cálculo, o elemento verifica a segurança. Conclui-se que os resultados obtidos pela ferramenta de cálculo são praticamente idênticos aos da resolução manual do exercício. As pequenas diferenças em alguns parâmetros devem-se apenas a arredondamentos.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo automático, com o objectivo de facilitar o cálculo para a verificação da segurança de colunas-viga, tendo em consideração as equações abordadas no EC3. Apresentaram-se os fundamentos e metodologias do EC3 tidos em consideração na elaboração da ferramenta e no seu uso correcto. Foi revelado o modo de funcionamento da ferramenta e verificou-se a vantagem da apresentação dos seus resultados de um modo rápido, preciso e simplificado. A interface desta ferramenta de cálculo com o programa “Excel”, possibilitando a introdução de um vasto número de elementos (colunas-viga), tal como a capacidade de analisar simultaneamente um grande número de elementos, são outras vantagens no uso da ferramenta. Esta ferramenta foi validada através da comparação dos seus resultados com resoluções manuais de problemas, de onde se concluiu que a ferramenta cumpriu os objectivos a que se tinha proposto, dado os seus resultados serem praticamente idênticos aos das resoluções.

No que se refere aos desenvolvimentos futuros, aponta-se a inclusão de outros perfis, como é o exemplo de perfis em T , cantoneiras e perfis em I soldados. Conforme foi referido no decurso da presente Dissertação, a ferramenta desenvolvida não contempla secções de classe 4 e a redução da resistência da secção na presença de esforço transversal e torção. Assim, será desejável incluir estes aspectos numa versão posterior. Será também vantajoso conceber uma forma de importar automaticamente, do programa de análise estrutural, os diagramas de esforços em cada barra.

BIBLIOGRAFIA

Boissonnade N., Greiner R., Jaspart J. P. e Lindner J. (2006). “*Rules for Member Stability in EN1993-1-1 Background Documentation and design guidelines*”, ECCS Technical Committee 8 – Stability.

Comissão Técnica Portuguesa de Normalização (2007). “*Anexo Nacional do Regulamento de Estruturas de Aço EC3*”.

Comité Européen de Normalisation (CEN) (2005). “*Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*”, Bruxelas.

Dias J. (2007). “*Análise e Dimensionamento de Estruturas Metálicas Treliçadas de Transporte de Energia Eléctrica de Acordo com o EC3(EN) e a EN50341-1*”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico.

Gonçalves R., Camotim D. (2004). “*On the Application of Beam-Column Interaction Formulae to Steel Members with Arbitrary Loading and support Conditions*”, Journal of Constructional Steel Research, vol. 60, no3-5, pp. 433-450.

Gonçalves R., Corrêa M. R. e Camotim D. (2009). “*Aplicação da Teoria Geometricamente Exacta de Vigas à Análise de Pórticos de Aço*”, Actas do VII Congresso de Construção Metálica e Mista.

Al Nageim H. K., MacGinley T. J. (2005), “*Steel Structures: Practical design studies*”, Taylor & Francis, 3th edition, London and New York.

http://www.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Estruturas/Estruturas_metalicas/

<http://www.office.microsoft.com/pt-pt/access-help/>

Mendonça P. (2006). “*Dimensionamento de Colunas-viga através das Equações de Interação do Eurocódigo 3*”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico.

Pinheiro A. (2005). “*Estruturas Metálicas: Cálculos, Detalhes, Exercícios e Projectos*”, Edgard Blucher, 2a Edição.

Reis A., Camotim D. (2001), “*Estabilidade estrutural*”, McGraw-Hill, Lisboa.

Simões R. (2005). “*Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas*”, Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.

ANEXO A

Este anexo tem como objectivo dar a conhecer a elaboração da ferramenta de cálculo através do programa “Access 2007” do “Microsoft Office”. Será apresentada, de forma sucinta, a funcionalidade deste programa como base de dados, e como os relaciona, tendo em conta as condições e equações impostas na elaboração da ferramenta de cálculo.



Figura A.1 - Ferramenta de cálculo – M.S. Access 2007

Como se pode observar pela Figura A.1, no campo relativo a “Todos os Objectos do Access”, são armazenados os “objectos” que contêm toda a informação da ferramenta de cálculo. O “Microsoft Access” dispõe de vários tipos de “objectos”, apresentando características e funcionalidades próprias. Assim, elaborou-se a ferramenta de cálculo recorrendo às potencialidades deste programa para suprimir as suas necessidades de cálculo.

Tabelas

A capacidade deste programa como base de dados, através do armazenamento de todos os parâmetros relevantes, foi tida em conta recorrendo às tabelas. Esses parâmetros são (i) os dados geométricos dos perfis, (ii) o valor da tensão de cedência do aço para as respectivas classes, (iii) os valores admissíveis para o parâmetro “kz” no cálculo do momento crítico do elemento e para a (iv) susceptibilidade à torção. Para o efeito foram criadas diferentes tabelas - (i) “fy”, (ii) “kz”, (iii) “Perfil”, (iv) “Resistência” e (v) “Susceptibilidade” (Figura A.2). De

seguida foi criada a tabela “Definir Peça”, para que sejam assumidos os valores introduzidos pelo utilizador na definição dos elementos, i.e., a introdução das variáveis: (i) “Nome Peça”, (ii) “Perfil”, (iii) “fy”, (iv) “Ym0”, (v) “Ym1”, (vi) “Resistência”, (vii) “Susceptibilidade”, (viii) “kz”, (ix) “Kw”, (x) “C1”, (xi) “C2”, (xii) “L”, (xiii) “Mcr”, (xiv) “Lcry”, (xv) “Lcrz”, (xvi) “NEd”, (xvii) “MyEd”, (xviii) “MzEd”, (xix) “MyEd,ext.”, (xx) “MzEd,ext.”, (xxi) “Cmy”, (xxii) “Cmz”, (xxiii) “CmLT” e (xxiv) “Caixa de Seleção”.

Para os parâmetros da tabela “Definir Peça” coincidentes com as tabelas já enunciadas, foram estabelecidas “Caixas de Combinação” entre eles, para que o utilizador se limite a optar pelos valores pré-estabelecidos para estes (“Perfil”, “fy”, “Resistência”, “Susceptibilidade” e “kz”).

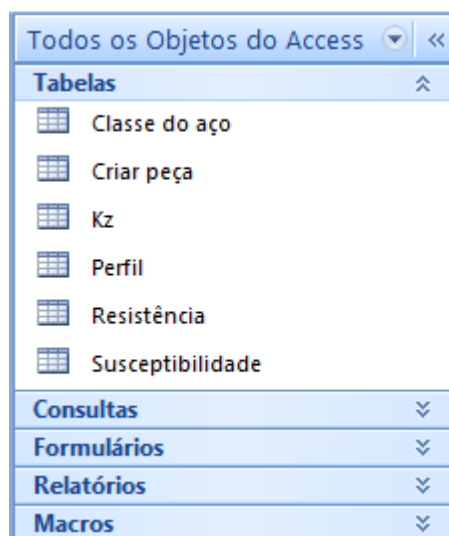


Figura A.2 - Tabelas da ferramenta de cálculo

Consultas

Para relacionar os dados das tabelas através das condições e fórmulas preconizadas pelo EC3, recorreu-se às consultas. Estes “objectos” são os “responsáveis” pelas análises e resultados da ferramenta de cálculo, dado serem através deles que se impõem todas as equações e condições ao cálculo. Por razões de limitação de parâmetros, foram criadas quatro “consultas” distintas: (i) “Resistência da Secção”, (ii) “Verificação Torção”, (iii) “M-N” e (iv) “Verificações Finais” (Figura A.3).

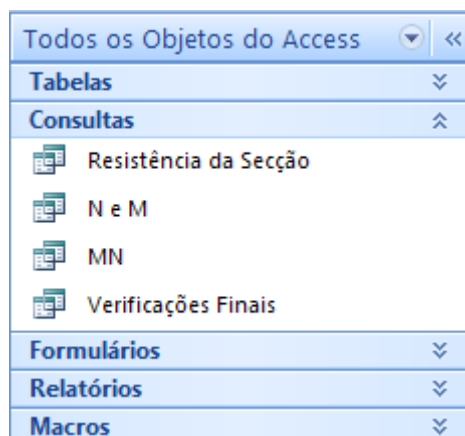


Figura A.3 - Consultas da ferramenta de cálculo

Resistência da Secção

Esta consulta tem a função de calcular a resistência das secções transversais dos elementos, tal como os parâmetros de encurvadura e respectivas resistências reduzidas. Para o efeito, é estabelecida a relação entre as tabelas “Definir Peça” e “Perfil” (Figura A.4), através do parâmetro em comum “Nome Perfil”, para que assim possam ser tidos em conta os parâmetros relativos às duas “tabelas” nas equações elaboradas nesta consulta.

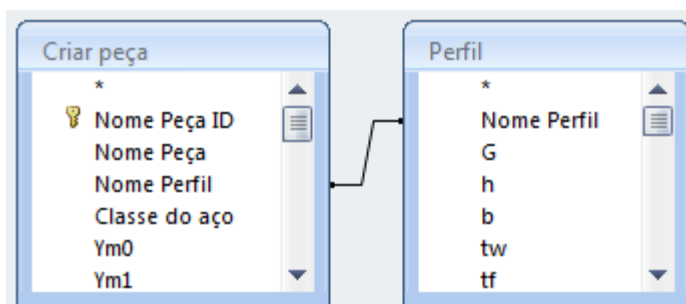


Figura A.4 - Relação estabelecida entre a tabela “Criar Peça” e “Perfil”

Assim, os parâmetros relevantes calculados nesta consulta são:

- i. $N_{pl,Rd}$
- ii. $V_{z,pl,Rd}$ e $V_{y,pl,Rd}$
- iii. $M_{c,y,Rd}$ e $M_{c,z,Rd}$ através do cálculo de $M_{y,pl,Rd}$, $M_{y,el,Rd}$, $M_{z,pl,Rd}$ e $M_{z,el,Rd}$
- iv. $\bar{\lambda}_y$; α_y ; ϕ_y ; χ_y e $N_{b,y,Rd}$
- v. $\bar{\lambda}_z$; α_z ; ϕ_z ; χ_z e $N_{b,z,Rd}$
- vi. $\bar{\lambda}_{LT}$; α_{LT} ; ϕ_{LT} ; χ_{LT} e $M_{b,Rd}$

N e M

Esta consulta assume os parâmetros e respectivos valores obtidos da consulta anterior (“Resistência da Secção”), não necessitando que sejam estabelecidas relações entre tabelas e/ou “consultas”, tal como acontece na consulta citada anteriormente. A sua função é de calcular os parâmetros relevantes na verificação da segurança à encurvadura de colunas-viga. Os parâmetros calculados nesta consulta são:

- i. k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz}
- ii. Os resultados das equações (6.61) e (6.62)

MN

Esta consulta assume os parâmetros e respectivos valores obtidos da consulta – “Verificação Torção”, e por isso não necessita que sejam estabelecidas quaisquer relações entre tabelas e/ou consultas, tal como acontece na consulta anterior. A sua função consiste em calcular os parâmetros relevantes na verificação das secções de extremidade, procedendo-se à redução da resistência plástica do momento flector, se necessário, devido à presença do esforço axial. Assim, os parâmetros calculados nesta consulta são:

- i. n
- ii. a , a_f e a_w
- iii. α e β
- iv. $M_{N,y,Rd}$ e $M_{N,z,Rd}$
- v. Os resultados das equações (6.41)

Verificação Final

Esta consulta, tal como as anteriores, assume os parâmetros e respectivos valores obtidos na consulta – “M-N”, e por isso não necessita que sejam estabelecidas relações entre tabelas e/ou consultas. A sua função é de relacionar os resultados das equações (6.61), (6.62) e (6.41) obtidos nas consultas anteriormente mencionadas, para assim dar a informação final ao utilizador sobre a segurança do elemento através da apresentação dos resultados “Verifica” ou “Não Verifica”.

Formulários

Elaboradas as tabelas e consultas da ferramenta de cálculo, existe a necessidade de criar uma interface de comunicação entre o utilizador e a ferramenta de cálculo. Para o efeito recorreu-se aos formulários que têm a função de dar acesso a outros itens (“Menu Entrada”), tal

como a função de definir os elementos para análise, tendo acesso a parâmetros armazenados nas tabelas (“Definir Peça” e “Definir Peça (Modo Excel)”).

A Figura A.5 revela os formulários criados para esta ferramenta de cálculo.

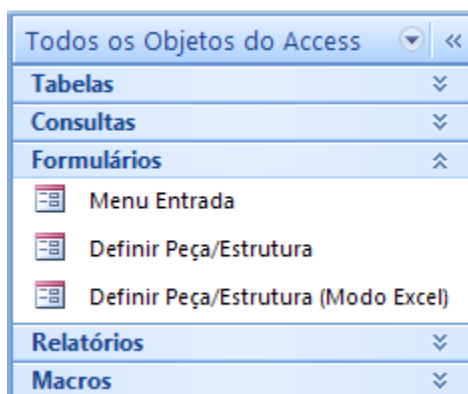


Figura A.5 - Formulários da ferramenta de cálculo

Relatórios

A necessidade de dar a conhecer ao utilizador os resultados mais relevantes do ponto de vista da verificação da segurança dos elementos é resumida recorrendo aos relatórios. Os resultados apresentados por estes são obtidos pelas consultas, tendo estes a única função de os revelarem de uma forma prática e simplificada. A Figura A.6 revela os dois relatórios criados para esta ferramenta de cálculo.

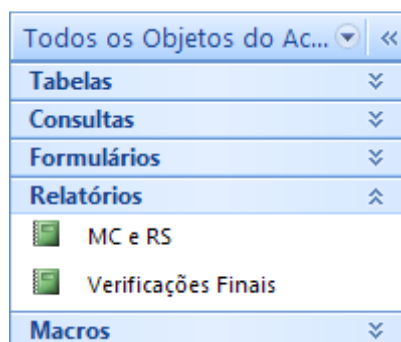


Figura A.6 - Relatórios da ferramenta de cálculo

Macros

Depois de elaborados todos os formulários e relatórios, existe a necessidade de criar comunicações entre eles, para que o utilizador possa ter acesso a todos a partir do formulário – “Menu Entrada”. Para o efeito recorreu-se às “macros”, pois são ferramentas que permitem automatizar tarefas e adicionar funcionalidades aos “objectos” a que estão associados, através da criação de botões.

Relativamente aos botões “ajuda”, que têm como função informar o utilizador do modo correcto de utilização da ferramenta de cálculo, também para estes casos foram associadas macros (“macro1” e “macro2”), tal como se pode ver pela Figura A.7.

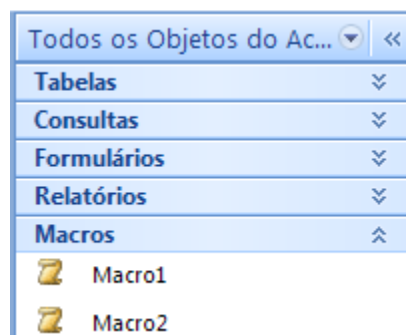


Figura A.7 - Macros da ferramenta de cálculo